

# **AJAN NUOLI**

Tapahtumien aikajärjestys ja ajan suunta

Ville Virtanen

Tampereen yliopisto

Yhteiskunta- ja kulttuuritieteiden yksikkö

Filosofian pro gradu -tutkielma

Huhtikuu 2013

VIRTANEN, VILLE: Ajan nuoli. Tapahtumien aikajärjestys ja ajan suunta

Pro gradu -tutkielma, 127 sivua  
Huhtikuu 2013

---

Jokapäiväisessä elämässä vaikuttaa itsestään selvältä, että ajalla on tietty suunta. Aika kulkee tulevaisuuteen eikä menneisyyteen, ja tulevaisuus ja menneisyys ajan kahtena suuntana eroavat selvästi toisistaan. Menneisyys on koettu jo kertaalleen, ja siitä on muistoja, eikä siihen voida vaikuttaa. Tulevaisuus taas on täynnä erilaisia mahdollisuuksia, mutta sitä ei voida muistella, vaan korkeintaan ennustaa. Tämän lisäksi tapahtumilla havaitaan olevan selvä järjestys tässä ajan virrassa. Toiset tapahtumat ovat samanaikaisia toisten kanssa, toiset tapahtuvat toisia ennen tai toisten jälkeen, ja jotkin tapahtumat ovat kahden muun tapahtuman välissä. Tapahtumilla on siis intuitiivinen aikajärjestys ja tällä järjestyksellä on intuitiivinen suunta.

Fysikaaliset lait eivät kuitenkaan tee eroa tulevaisuuden ja menneisyyden välillä. Kaikki ihmisten kokemukselle merkitykselliset fysikaaliset prosessit, jotka voivat tapahtua tulevaisuuden suuntaan, voivat tapahtua myös menneisyyden suuntaan. Intuitiivisesti koettu ero menneisyyden ja tulevaisuuden välillä on siis vallitsevien fysikaalisten teorioiden valossa pelkästään ihmisestä riippuvainen. Ajalla ei ole suuntaa ihmisistä riippumattomassa todellisuudessa. Fysikaaliset teoriat eivät myöskään määritä objektiivista järjestystä tapahtumille. Niiden mukaan kaksi tapahtumaa voivat jonkin yksilön mukaan olla samanaikaiset, mutta toisen yksilön mukaan nämä eivät tapahdu samaan aikaan. Nämä teoriat eivät myöskään pysty määrittelemään sitä, mitkä tapahtumat tapahtuvat toisten välissä, tai sitä, mikä tapahtuma tapahtuu ennen (tai jälkeen) mitäkin tapahtumaa. Ajan suunnalle tai aikajärjestykselle ei vallitsevissa fysikaalisissa teorioissa esitetä minkäänlaista fysikaalista perustaa.

Tässä pro gradu -tutkielmassa argumentoidaan, että määrittelemällä uudelleen joitakin ajallisia käsitteitä sekä olettamalla tiettyjä reunaehdoja voidaan ajan suunnalle ja tapahtumien aikajärjestykselle löytää myös fysikaalinen perusta. Erityisesti tässä työssä esitetään, että kausaalisessa ajanteoriassa tehdyt määritelmät tuottavat objektiivisen aikajärjestyksen ja että termodynaamiset prosessit tuottavat tietyillä reunaehdoilla ajan suunnan. Lisäksi näiden määritelmien ja reunaehtojen osoitetaan olevan sekä yhteensopivia modernien fysikaalisten ja kosmologisten teorioiden kanssa että uskottavia niiden valossa. Niin ikään kausaalisesta ajanteorian määritelmistä ja termodynaamisten teorioiden reunaehdoista puolustetaan niiden kritiikkiä vastaan, ja näiden teorioiden esitetään olevan paras saatavilla oleva vastaus edellä mainittuihin ajan luonnetta koskeviin ongelmiin.

Avainsanat: aika, ajan filosofia, fysiikan filosofia, termodynamiikka, ajan suunta, suhteellisuusteoria

## Sisällysluettelo

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 AIKAJÄRJESTYKSEN ONGELMA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Absoluuttinen ja relativistinen aika-avaruus.....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Absoluuttinen ja relativistinen avaruus.....	7
2.1.2 Pituuskontraktio .....	10
2.1.3 Aikadilataatio .....	13
<b>2.2 Suhteellisuusteoria ja aika .....</b>	<b>15</b>
2.2.1 Ajan mittaaminen .....	15
2.2.2 Samanaikaisuus .....	17
2.2.3 Viitekehykset ja samanaikaisuus.....	21
2.2.4 Viitekehykset ja ajallinen kesto .....	22
<b>3 AJAN SUUNNAN ONGELMA .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Ajankäännös-invarianssi .....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Albert ajankäännös-invarianssista.....	28
3.1.2 Kritiikki Albertin versiota vastaan .....	31
3.1.3 Ajankäännös-operaatio.....	32
<b>3.2 Ajan anisotropia .....</b>	<b>39</b>
3.2.1 Ajan anisotropian määritelmä .....	39
3.2.2 Anisotropian määritelmien kritiikki .....	42
3.2.3 Mahdollisia anisotropisia prosesseja.....	45
<b>3.3 Ajan suunnistuvuus .....</b>	<b>49</b>
<b>4 KAUSAALINEN AJANTEORIA.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Kausaalisen ajanteorian versioita .....</b>	<b>52</b>
4.1.1 Reichenbachin varhainen teoria .....	52
4.1.2 Reichenbachin myöhempi teoria.....	55
4.1.3 Grünbaumin kausaalinen ajanteoria.....	59
4.1.4 Van Fraassenin esitys kausaalisesta ajanteoriasta.....	63
<b>4.2 Kausaalisten ajanteorioiden kritiikki.....</b>	<b>66</b>
4.2.1 Kritiikki Reichenbachin teoriaa vastaan .....	66
4.2.2 Grünbaumin version kritiikki .....	68
4.2.3 Yleinen kritiikki kausaalisia teorioita vastaan .....	71
<b>5 TERMODYNAMIIKKA JA AJAN SUUNTA .....</b>	<b>76</b>

<b>5.1 Klassinen ja statistinen termodynamiikka .....</b>	<b>76</b>
5.1.1 Klassinen termodynamiikka.....	76
5.1.2 Statistinen termodynamiikka.....	78
<b>5.2 Termodynaamiset ajan suunnan teorit .....</b>	<b>81</b>
5.2.1 Termodynaaminen ajan suunta .....	81
5.2.2 Klassisen termodynaamisen ajan suunnan kritiikki .....	82
5.2.3 Statistisen termodynamiikan ongelmat .....	84
<b>6 TERMODYNAAMISTEN TEORIOIDEN MONET KASVOT .....</b>	<b>88</b>
<b>6.1 Menneisyshypoteesi .....</b>	<b>88</b>
6.1.1 Menneisyshypoteesi ja sen motiivi .....	88
6.1.2 Omapainovoimaisten systeemien entropia.....	91
6.1.3 Epätodennäköisen alkutilan selitykset .....	94
6.1.4 Inflaatioteoriat menneisyshypoteesin selittäjinä .....	97
6.1.5 Menneisyshypoteesi selittämättömänä hypoteesina.....	101
<b>6.2 Haarasysteemit .....</b>	<b>102</b>
6.2.1 Reichenbachin haarasysteemit .....	103
6.2.2 Grünbaum haarasysteemeistä.....	107
<b>7 TERMODYNAMIIKKA JA PSYKOLOGINEN AJAN SUUNTA .....</b>	<b>110</b>
<b>7.1 Ajan suunnan termodynaaminen reduktio .....</b>	<b>110</b>
7.1.1 Jälkien anisotropian reduktio .....	110
7.1.2 Kausaalisen selitysmallin ja informaation kasvun reduktio.....	113
<b>7.2 Termodynaamisen reduktion kritiikki.....</b>	<b>114</b>
7.2.1 Psykologisen ajan suunnan reduktion kritiikki .....	115
7.2.2 Korkean entropian tilat jälkinä.....	116
7.2.3 Klassinen mekaniikka ja jälkien anisotropia.....	119
<b>8 LOPUKSI.....</b>	<b>122</b>
<b>Lähdeluettelo .....</b>	<b>124</b>

## 1 JOHDANTO

Jokapäiväisessä elämässä pidetään itsestäänselvyytenä, että aika kulkee tiettyyn suuntaan ja että tulevaisuus ja menneisyys eroavat jollakin merkittäväällä tavalla toisistaan. Menneisyyteen ei voida vaikuttaa ja siitä on muistoja, mutta tulevaisuuteen voidaan vaikuttaa ja siitä taas ei ole muistoja. Tämän lisäksi yhä enemmän tulevaisuutta muuttuu koko ajan menneisyydeksi, eikä menneisyys koskaan muutu tulevaisuudeksi. Ajalla näyttää siis olevan tietty annettu kulkusuunta, ja tapahtumat tapahtuvat tietyssä annetussa järjestyksessä ässä ajan virrassa. Nyt voidaan kuitenkin kysyä, onko ajalla ihmisestä riippumatonta suuntaa, tai eroavatko tulevaisuus ja menneisyys toisistaan, jos ihmisten kokemusta näistä ei oteta huomioon. Onko siis olemassa jotakin fysikaalista perustetta ajan suunnalle ja tapahtumien aikajärjestykselle, vai ovatko ne vain ihmisten havaintokyvystä seuraavia subjektiivisia kokemuksia – jotakin, minkä ihminen luo maailmaan?

Tässä pro gradu -työssä tutkitaan kahta toisiinsa liittyvää ajan luonnetta koskevaa ongelmaa: sitä, onko tapahtumilla ajallista järjestystä, ja sitä, onko ajalla suuntaa. Erityisesti tässä tutkitaan sitä, onko näille intuitiivisesti koetuille ilmiöille olemassa fysikaalista perustetta, eli onko niitä olemassa muutenkin kuin ihmisten havaintokykyjen postuloimina ilmiöinä. Tutkielman alkupuoliskon tarkoituksena on osoittaa, että vallitsevat fysikaaliset teoriat eivät pysty tuottamaan objektiivista (subjektiivisesta kokemuksesta riippumatonta) tapahtumien aikajärjestystä, eivätkä selittämään intuitiivisesti koettua ajan kulkusuuntaa – tai menneisyyden ja tulevaisuuden välistä eroa. Tämän valossa tutkielman toisella puoliskolla esitelläänkin filosofisia teorioita, joiden tarkoituksena on selvittää nämä fysikaalisten teorioiden puutteet. Näissä teorioissa esitetään, että käsitteiden uudelleenmäärittelyn ja tiettyjen reunaehtojen avulla fysikaaliset teoriat voivat luoda aikajärjestykselle ja ajan suunnalle myös fysikaalisen perustan. Tutkielman toinen puolisko käytetään siis edellä mainittujen ajan luonnetta koskevien ongelmien selvittämiseen. Erityisesti argumentoin, että kausaalinen ajan-teoria voi vastata tapahtumien aikajärjestystä koskevaan ongelmaan ja että termodynaamiset prosessit voivat selittää ajan suunnan. Tuon tietenkin esille myös kausaalista ajanteoriaa ja termodynaamista ajan suunnan teoriaa vastaan esitettyjä kritiikkejä, mutta tulen esittämään, että nämä kritiikit eivät ole ratkaisevia ja että usein ne seuraavat kritisoitavan teorian väärinymmärtämisestä.

Jo silloin kun kysytään, onko tapahtumilla objektiivista aikajärjestystä, tai onko ajalla objektiivista suuntaa, oletetaan jotakin ajan ja tapahtumien olemassaolosta. Näitä kysymyksiä ei ole mielekästä kysyä, jolleivät aika ja tapahtumat todella ole olemassa. Tämän työn puitteissa oletetaan, että aika on olemassa ihmisestä riippumattomana asiana – tai pikemminkin että aika-avaruus on olemassa, sillä aikaa ja avaruutta ei voida fysikaalisten teorioiden mukaan (eikä siis myöskään tässä työssä) täysin erottaa toisistaan. Tässä tutkielmassa siis toimitaan vallitsevien fysikaalisten teorioiden viitekehyksestä, eikä käsitellä metafysisistä kysymystä ajan olemassaolosta. Työn tarkoituksena on kuitenkin toimia filosofisena tutkimuksena, mistä syystä fysiikan teorioita esitellään vain siinä määrin, kuin niiden tunteminen on välttämätöntä filosofisten ongelmien ja vastausyritysten ymmärtämiseksi.

Luvussa kaksi käsitellään aikajärjestyksen ongelmaa. Ensin argumentoin, että relativistinen käsitys ajasta ja avaruudesta selittää havaintoja paremmin kuin absoluuttinen käsitys. Sen jälkeen tuon esille, miten suhteellisuusteorian viitekehyksessä ymmärretään tapahtumien samanaikaisuus ja kahden tapahtuman välillä kulunut aika. Näiden seikkojen osoitetaan olevan subjektiivisia, mistä seuraa, että suhteellisuusteoriassa tapahtumien aikajärjestys on myös subjektiivinen. Tästä subjektiivisuudesta johtuen tapahtumien aikajärjestyksellä ei vaikuta olevan fysikaalista perustetta suhteellisuusteoriassa. Toisessa luvussa siis esitellään aikajärjestyksen ongelma ja siihen johtavat tekijät, mutta tämän ongelman ratkaisuyrityksiä käsitellään vasta myöhemmin.

Kolmannessa luvussa siirrytään käsittelemään toista ajan luonteeseen liittyvää ongelmaa, nimittäin sitä, onko ajalla suuntaa. Siinä esitän, että fysikaalinen peruste ajan suunnalle vaatii, että jokin fysikaalinen prosessi on sellainen, että se toimii vain toiseen suuntaan ajassa. Tällaiset prosessit erottelisivat ajan kaksi suuntaa toisistaan ja niihin voitaisiin perustaa ajan nuoli. Ajankäännöksiä käsitellessä tarkastellaan sitä, millä tavalla prosessin toimiminen (tai ei toimiminen) toiseen suuntaan ajassa tulee ymmärtää, ja miten sitä voidaan testata. Tämän jälkeen kolmannen luvun loppupuolella esitetään, että ainakin suurin osa fysikaalisista prosesseista näyttää toimivan aivan yhtä hyvin molempiin ajallisiin suuntiin. Itse asiassa vaikuttaa siltä, että minkään prosessin ei olisi täysin mahdollonta tapahtua myös toiseen suuntaan ajassa. Tämän seikan argumentoin johtavan ajan suunnan ongelmaan, eli siihen, että intuitiivisesti koetulle ajan suunnalle ei voida esittää nykyisten fysikaalisten teorioiden puitteissa mitään perustavaa syytä.

Näiden ajan luonnetta koskevien ongelmien esittelemisen jälkeen siirryn käsittelemään näihin ongelmiin esitettyjä ratkaisuja. Kausaaliset ajanteoriat yrittävät ratkaista tapahtumien aikajärjestyksen ongelman, ja näitä teorioita käsitellään luvussa neljä. Ensin tässä luvussa esitellään neljä kausaalista ajanteoriaa, joiden ajallisissa määritelmissä (kuten samanaikaisuuden, ajallisen välissä-relaation ja ajallisen ennen kuin -relaation määritelmissä) nähdään selkeitä eroavaisuuksia. Samalla arvioidaan sitä, miten nämä versiot onnistuvat edellä mainittujen määritelmien muotoiluissa. Tämän jälkeen esitellään kausaalisia ajanteorioita vastaan esitettyä kritiikkiä, mutta samalla argumentoin myös, että ainakin osa näistä kritiikeistä on perusteettomia, eivätkä loputkaan vaikuta ratkaisevilta.

Kausaalinen ajanteoria yrittää vastata aikajärjestyksen ongelmaan, mutta ajan suunnan ongelmaan se ei anna tyydyttävää vastausta. Erityisen mielekkäänä ehdokkaana ajankäännös-epäinvariansseiksi prosesseiksi (joihin tehtiin ensikatsaus luvussa kolme) on pidetty termodynaamisia prosesseja. Luvussa viisi tehdään lyhyt katsaus termodynamiikkaan, ja varsinkin termodynamiikan toiseen pääsääntöön, joka sanoo, että tietty termodynaaminen suure (entropia) kasvaa ajan kuluessa. Tässä luvussa esitellään klassista termodynamiikkaa ja modernia statistista termodynamiikkaa, sekä esittää, millä tavalla termodynamiikasta voidaan ajatella löytyvän fysikaalinen perusta ajan suunnalle. Luvun viisi lopuksi kuitenkin tuon esille, että yksinään termodynamiikkaan ei ajan suuntaa voida perustaa, vaan myös termodynamiikka vaatii tiettyjä reunaehtoja, jotta se tekisi eron ajan suuntien välillä.

Luvussa kuusi tarkastellaan sitä, millaisia reunaehtoja on oletettava, jotta termodynaamiset prosessit todella olisivat ajankäännös-epäinvariantteja. Erityisesti menneisyshypoteesissa ja haarasysteemi-hypoteesissa esitellään tällaisia ehtoja, mutta näiden molempien huomataan tukeutuvan samanlaiseen strategiaan, ja haarasysteemihypoteesi voidaankin nähdä tavallaan menneisyshypoteesin johdannaisena. Lisäksi tässä luvussa arvioin näiden hypoteesien ja niiden postuloimien reunaehtojen uskottavuutta, ja argumentoin, että nykyisistä kosmologisista teorioista voidaan löytää menneisyshypoteesia tukevia piirteitä. Näiden reunaehtojen valossa osoitetaan, että termodynamiikkaa tulee pitää varteenotettavana vaihtoehtona ajan suunnan fysikaaliseksi perustaksi.

Kun nyt on esitetty, että fysikaalinen ajan suunta voidaan palauttaa termodynaamisten prosessien ajalliseen-epäinvarianssiin, niin luvussa seitsemän argumentoidaankin sen puolesta, että myös psykologinen ajan suunta voidaan selittää termodynamiikan avulla. Tässä luvussa siis esitetään, että myös ihmisten havaitsema ajan suunta (kuten muistojen kerääntyminen, selityksien kausaalinen luonne ja menneisyydestä jääneet jäljet) voidaan selittää termodynamiikan avulla. Lisäksi tässä esitellään tätä psykologisen ajan reduktiota vastaan esitettyä kritiikkiä, mutta jälleen argumentoin, että näissä kritiikeissä joko ymmärretään väärin tärkeitä asioita termodynaamisesta ajan suunnan teoriasta, tai sitten ne ovat muulla tavalla puutteellisia, eivätkä ainakaan selitä mielekkäämmin mitään seikkaa, jonka termodynaaminen reduktio selittää.

Lopulta viimeisessä kahdeksannessa luvussa kerätään yhteen tuloksia, joihin tässä pro gradu -työssä on päädytty, mikäli filosofisessa tutkielmassa nyt yleensä mihinkään varsinaiseen tulokseen voidaan päätyä. Toivon kuitenkin, että tämä työ toimii johdattelevana tekstinä filosofisiin aikaa koskeviin kysymyksiin, kuten onko tapahtumilla järjestystä ajassa tai onko ajalla suuntaa. Lisäksi tekstin tavoitteena on tuoda esille omia kantojani koskien näitä kysymyksiä, sekä mahdollisesti toimia kausaalisen ajanteorian ja termodynaamisen ajan suunnan teorian puolustajana.



## 2 AIKAJÄRJESTYKSEN ONGELMA

Tapahtumien aikajärjestys näyttää muodostavan ongelman suhteellisuusteorian viitekehyksessä. Suhteellisuusteorian valossa tarkasteltuna aikajärjestys ei ole niin yksinkertainen, kuin yleensä ajatellaan. Tässä luvussa esitelläänkin, mitä aikajärjestyksen ongelma tarkalleen ottaen tarkoittaa, ja mitkä tekijät siihen johtavat. Yhtä vastausvaihtoehtoa käsitellään luvussa neljä, jossa esitellään kausaalista ajanteoriaa, ja juuri aikajärjestyksen ongelman nähdään olevan motiivina tälle kausaaliselle teorialle aikajärjestyksestä. Newtonilainen käsitys ajasta ja avaruudesta varjostaa arkiajattelua, vaikka sen heikkouksista ollaan hyvin tietoisia. Yleisesti aikaa pidetään kuitenkin edelleen kaikille havaitsijoille samana ja absoluuttisena asiana. Seuraavassa osoitetaan kuitenkin, että aikajärjestys ei ole yksiselitteinen, kun suhteellisuusteoria astuu mukaan kuvioon.

### 2.1 Absoluuttinen ja relativistinen aika-avaruus

Aika-avaruudella tarkoitetaan ajan ja avaruuden yhdessä muodostamaa jatkumoa. Aikaa ja avaruutta ei voida suhteellisuusteorian mukaan täysin erottaa toisistaan, vaan ne ovat toisiinsa nähden perustavassa yhteydessä. Tästä johtuen aikaa ja avaruutta onkin tutkittava yhdessä eikä erillään, ja siksi puhutaan aika-avaruudesta yhtenä konseptina. Aikaa voidaan ajatella tässä tavallaan neljäntenä ulottuvuutena totuttujen kolmen spatiaalisen ulottuvuuden lisäksi. Ajasta ja avaruudesta on esitetty monia erilaisia teorioita, joita seuraavassa esitellään. Näiden teorioiden esittelyn tarkoituksena on tuoda esille erityisesti se, millaisesta tieteellisestä keskustelusta suhteellisuusteoria ponnistaa.

#### 2.1.1 Absoluuttinen ja relativistinen avaruus

Erilaiset teoriat avaruudesta voidaan jakaa karkeasti absoluuttisiin ja relativistisiin. Keskustelu absoluuttisesta ja relativistisesta avaruudesta alkoi historiallisesti Newtonin ja Leibnizin avaruuden luonnetta koskevista näkemyseroista. Newton oli sitä mieltä, että avaruus on absoluuttinen, liikku-maton, muuttumaton ja jakamaton. Hänen mukaansa kappaleet sijaitsevat avaruudessa, ja avaruus määrittää niiden liikkeen, nopeuden ja välimatkan. Leibniz taas ajatteli, että avaruutta itsessään (erillisenä kappaleista) ei ole olemassa, vaan kappaleiden nopeudet ja liike on vain suhteellista muihin kappaleisiin nähden. Absoluuttista avaruutta ei siis Leibnizin mukaan ole olemassa.

Esimerkiksi Richard Swinburne (1968, 50) määrittelee absoluuttisen ja relativistisen avaruuden seuraavasti: ”Absolute Space is thus Space, the places constituting which are reidentified by the frame of reference which does not really move. Relative Space is Space, the places constituting which are reidentified by a frame of reference which does really move.” Absoluuttista avaruutta koskevassa keskustelussa voidaan siis nähdä olevan kyse viitekehysten ensisijaisuudesta. Absoluuttisen avaruuden kannattajat ovat sitä mieltä, että absoluuttinen avaruus on ensisijainen viitekehys, johon nähden kappaleet liikkuvat, mutta relativistien mukaan tällaista viitekehystä ei ole. Modernissa kielellä absoluuttisen avaruuden voidaan ymmärtää tarkoittavan eetteriä, joka täyttää avaruuden, ja jossa kappaleet liikkuvat. Eetteri olisi tällöin ensisijainen viitekehys, joka ei liiku, mutta jossa kappaleet liikkuvat.

Klassisissa teorioissa aikaa on tavallisesti ajateltu aina absoluuttisena. Myös Newtonin ja Leibnizin teorioissa ajan käsittely jääkin hyvin vähälle huomiolle, sillä sitä pidettiin ongelmattomana asiana. Esimerkiksi kaikissa Earmanin (1989, luku 2) esittelemissä<sup>1</sup> klassisissa aika-avaruuksissa aika on absoluuttinen, ja aika-avaruus voidaan jakaa *aikaviipaleisiin*, joissa kaikki tapahtumat ovat samanaikaisia. Tämä aikaviipaleisiin jakaminen osoittautuu kuitenkin mahdottomaksi suhteellisuusteoriaa käsiteltäessä, ja ajan absoluuttisuuden ja suhteellisuuden palataankin syvemmin myöhemmin. Tässä yhteydessä sanottakoon vain, että klassiset teoriat ajasta ja avaruudesta olettivat kaikki ajan olevan absoluuttinen.

Newton käyttää termiä *absoluuttinen liike* kuvaamaan kappaleen liikettä suhteessa absoluuttiseen avaruuteen (tai eetteriin). Yksi hänen argumenttinsa absoluuttisen avaruuden olemassaolon puolesta vetoaakin juuri siihen, että kappaleella ei voi olla absoluuttista liikettä, jollei ole olemassa absoluuttista avaruutta. Hänen mukaansa on eroteltava näkyvä liike, joka on suhteellista liikettä muihin kappaleisiin nähden ja todellinen liike, joka on absoluuttista liikettä. Jos tämä ”todellinen” liike halutaan säilyttää, niin absoluuttinen avaruus on postuloitava. (Van Fraassen 1970, 110–111.) Relativistien teorioiden mukaan tällaista absoluuttista liikettä ei kuitenkaan ole olemassa, vaan kaikki liike

---

<sup>1</sup> Earman (1989, luku 2) jakaa klassiset aika-avaruudet Machilaiseen (absoluuttinen samanaikaisuus ja Euklidinen kolmiulotteinen avaruus), Leibnizilaiseen (Machilainen + ajan metriikka), Maxwellillaiseen (Leibniziläinen + kiertoliikkeen standardi viitekehys), uus-Newtonilaiseen (Maxwellilainen + absoluuttinen kiihtyvyyys), Newtonilaiseen (uus-Newtonilainen + absoluuttinen avaruus) ja Aristoteeliseen (Newtonilainen + avaruuden keskipiste) aika-avaruuteen.

on vain suhteellista toisiin kappaleisiin nähden. Täten relativististen teorioiden ei ole tarpeellista postuloida myöskään absoluuttista avaruutta.

Toinen Newtonin argumentti perustuu *kiihtyvyyden* käsitteeseen. Jos kaksi kappaletta on toisiinsa nähden kiihtyvässä liikkeessä, niin ainakin toiseen näistä kappaleista on Newtonin mukaan kohdistuttava jokin voima, joka saa aikaan liikkeen kiihtyvän nopeuden. Tämä kappale, johon voimat kohdistuvat, on Newtonin mukaan kiihtyvässä liikkeessä myös absoluuttisen avaruuden suhteen. Newtonilaisessa fysiikassa kappaleet säilyttävät nopeutensa (tai pysyvät paikallaan), jos niihin ei kohdistu mitään voimia, joten todellisen kiihtyvän liikkeen on oltava seurausta jostakin voimasta, joka kohdistuu kappaleeseen. Täten siis Newtonin mukaan kiihtyvä liike on todellista (absoluuttista) liikettä, eli suhteessa absoluuttiseen avaruuteen. Lisäksi koska se johtuu kappaleeseen kohdistuvista voimista, niin sen mukana havaitaan tiettyjä voimavaikutuksia (force effect). Tällaisia voimavaikutuksia on esimerkiksi keskipakoisvoima, jota esiintyy pyörimisliikkeessä olevissa kappaleissa. Nyt siis Newtonin mukaan pyörimisliikkeen on oltava absoluuttista liikettä, koska siinä esiintyy edellä mainittuja voimavaikutuksia. (Van Fraassen 1970, 111–112.) Koska taas absoluuttinen liike vaatii absoluuttisen avaruuden, niin kiihtyvä liike (ja sen mukana havaitut voimavaikutukset) selittyvät vain absoluuttisen avaruuden avulla.

Newtonin oma esimerkki koskien pyörimisliikettä absoluuttisena liikkeenä on seuraavanlainen: Kuvitellaan, että universumissa on vain kaksi planeettaa, joita pitää tietyn välimatkan päässä toisistaan jonkinlainen köysi. Jos nämä kaksi planeettaa pyörivät yhteisen keskipisteen ympäri, niin tähän köyteen kohdistuu jokin voima, joka näkyy köyden jännittyneisyytenä. Täten molempiin planeettoihin kohdistuu tietty voima, joka työntää planeettoja poispäin tästä yhteisestä painovoiman keskipisteestä. Tästä voimasta seuraa köyden kireys, ja siitä voidaan myös laskea näiden planeettojen absoluuttisen pyörimisliikkeen nopeus. (Newton 1934, 12.) Absoluuttinen avaruus voidaan Newtonin mukaan siis todistaa olemassa olevaksi esimerkiksi pyörimisliikkeen avulla. Nämä kaksi planeettaa eivät ole suhteellisessa liikkeessä toisiinsa nähden, vaan niiden välimatka pysyy aina samana. Silti niihin kohdistuu voimia, jotka ilmenevät köyden kireytenä, ja nämä voimat ilmentävät todellista – absoluuttista – liikettä suhteessa absoluuttiseen avaruuteen. Koska tällaisia voimia havaitaan esimerkiksi pyörimisliikkeen tapauksessa myös *normaalissa* (tähtien ja planeettojen kansoittamassa) universumissa, niin Newtonin mukaan absoluuttisen avaruuden on oltava olemassa. Vain absoluuttisen avaruuden avulla voidaan selittää havainnot tällaisista voimista ja voimavaikutuksista.

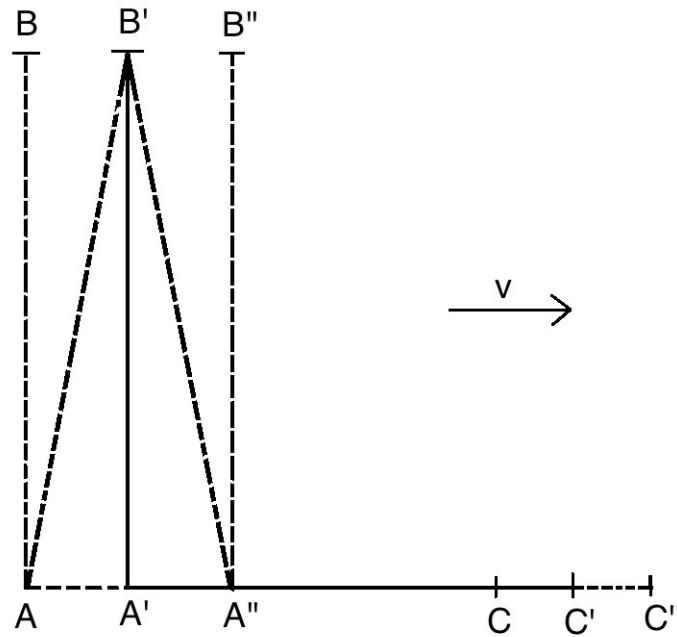
Nyt on kuitenkin ensisijaisen tärkeää huomata, että vaikka tällaisia voimia havaitaan *normaalisti*, niin ei voida tietää, havaittaisiinko niitä Newtonin esimerkin erikoistapauksessa. Voimien syntyminen vaatii planeettojen kiertoliikkeen, mutta tällaista liikettä ei ole mahdollista käsittää tyhjässä avaruudessa, mikäli kaksi planeettaa on toisiinsa nähden paikallaan. Jos siis kiertoliike ei ole mahdollinen, niin myöskään mitään voimavaikutuksia ei synny, eikä Newtonin argumentti ole pätevä. Leibnizin kanta olikin se, että *normaalissa* tapauksessa universumin tähtien pysyminen suhteellisen paikallaan kiertoliikkeessä olevaan kappaleeseen nähden saa aikaan edellä mainitut voimavaikutukset. Paikallaan pysyvät tähdet (universumin massa) siis synnyttävät viitekehyksen, joka vaikuttaa absoluuttiselta avaruudelta. Relativistisen avaruuden kannattaja tarvitsee siis esimerkiksi absoluuttisen kiihtyvyyden ja voimavaikutuksien selittämiseen vain jonkin paikallaan pysyvän viitekehyksen (kuten paikallaan pysyvät tähdet), joka toimii absoluuttisen avaruuden korvaajana. (Van Fraassen 1970, 113–115.)

Ainakaan täysin vedenpitäviä todisteita Newton ei siis pysty antamaan absoluuttisen avaruuden puolesta, vaan näyttää siltä, että kaikki tähän asti havaitut ilmiöt pystytään selittämään myös ilman absoluuttista avaruutta. Relativistiset teoriat olivat kuitenkin vielä pitkään Newtonin ja Leibnizin keskustelun jälkeenkin altavastaajia aika-avaruuden teorioiden joukossa. Seuraavaksi esitellään kuitenkin kaksi kokeellista tulosta (pituuskontraktio ja aikadilataatio), jotka näyttävät antavan todistusaineistoa absoluuttista avaruutta vastaan.

### 2.1.2 Pituuskontraktio

Absoluuttisen avaruuden todistamista varten kehitettiin muun muassa Michelsonin-Morleyn koe. Tämän kokeen tarkoituksena oli tutkia maapallon absoluuttista liikettä, eli sen liikettä suhteessa absoluuttiseen avaruuteen (tai eetteriin). Michelsonin-Morleyn kokeessa testausasetelma on oheisen kuvan (Kuva 2.1) mukainen. Siinä on kaksi toisiinsa kiinnitettyä *valokelloa* (light clock), jotka ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Valokello on yksinkertaisuudessaan kahden peilin muodostama laite, jossa valonsäde kulkee peilien välistä matkaa heijastuen aina peilistä toiseen. Tässä kokeessa siis valonsäde halkaistaan peilin A kohdalla, josta se siis heijastuu samanaikaisesti kahteen eri suuntaan (kohti peiliä B ja kohti peiliä C). Peileistä B ja C valonsäteet heijastuvat jälleen takaisin peiliin A. Tarkoituksena on havainnoida valonsäteiden paluuta A:han ja näiden paluuhetkien

samanaikaisuutta. Tässä molemmat valokellot ovat yhtä pitkiä, eli pituudet AB ja AC ovat samat. Jos koesysteemi ei olisi liikkeessä, vaan pysyisi absoluuttisen avaruuden suhteen paikoillaan, niin silloin tietenkin molemmat valonsäteet palaisivat A:han samaan aikaan. (Van Fraassen 1970, 142–143.)



Kuva 2.1 (Michelsonin-Morleyn koe)

Koesysteemi on nyt paikallaan maan pinnalla, mutta maapallo taas on jatkuvassa liikkeessä suhteessa absoluuttiseen avaruuteen, jos sellainen on olemassa. Oletuksena on siis, että koesysteemi on todellisuudessa liikkeessä johonkin suuntaan ja että tämä suunta vaihtelee maapallon liikkeen mukana. Nyt voidaan kuvitella, että systeemi olisi liikkeessä vasemmalta oikealle (kuvan nuoli  $v$  osoittaa liikkeen suunnan), eli valokellon AC suuntaan, ja voidaan laskea, miten valonsäteiden paluu A:han tapahtuu tällöin. Koska valokellot ovat liikkeessä vasemmalta oikealle, niin valon kulkema matka peilin B suuntaan ja takaisin ei olekaan ABA, vaan AB'A''. Valonsäteiden kulkema matka AB'A'' voidaan laskea Pythagoraan lauseen avulla, jolloin saadaan  $AB'A'' = ABA / \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ , jossa  $v$  on koesysteemin nopeus suuntaan AC ja  $c$  on valonnopeus. Nyt siis voidaan laskea myös kuinka kauan valonsäteellä kestää matkassa AB'A''. Jos matkassa ABA valolta kestäisi aika  $\Delta t$

( $\Delta t = \frac{ABA}{c}$ ), niin matkassa  $AB'A''$  kestäisi aika  $\Delta_1 = \Delta t / \sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}$ . Tämä aika on *suurempi kuin*  $\Delta t$ , koska  $v$  on tässä suurempi kuin 0. (Van Fraassen 1970, 144–145.)

Nyt huomataan, että valon kulkema matka toisessa valokellossa säilyykin ennallaan, koska matka  $ACA$  on yhtä pitkä kuin matka  $AC'A''$ . Tässä valokellossa taas muuttujana toimii valon nopeus suhteessa koelaitteeseen. Valon nopeus on vakio suhteessa absoluuttiseen avaruuteen, mutta koelaitte on liikkeessä nopeudella  $v$  suhteessa absoluuttiseen avaruuteen. Nyt voidaan jälleen laskea, kuinka pitkä aika ( $\Delta_2$ ) valonsäteeltä tulisi kulua tähän matkaan  $AC'A''$  suhteessa aikaan  $\Delta t$  ( $\Delta t = \frac{ABA}{c} = \frac{ACA}{c}$ ), joka valolta kestäisi lenkin suorittamiseen, jos laite olisi paikallaan eetterissä. Nyt siis  $\Delta_2 = \frac{AC}{c-v} + \frac{CA}{c+v}$ , jossa  $AC=CA=AB=BA$ , joten  $\Delta_2 = \frac{c \times ABA}{c^2 - v^2} = \frac{ABA}{c} \times \frac{1}{1 - (v^2/c^2)}$ . Tähän taas voidaan sijoittaa edellä saatu  $\Delta t = \frac{ABA}{c}$ , jolloin vastaukseksi saadaan  $\Delta_2 = \Delta t / 1 - (\frac{v^2}{c^2})$ , joka on jälleen *suurempi kuin*  $\Delta t$ . Mielenkiintoista tässä on kuitenkin se, että kun edelliseen tulokseen sijoitetaan edellä laskettu  $\Delta_1$ , niin saadaan tulos  $\Delta_2 = \Delta_1 / \sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}$ , joka on *suurempi kuin*  $\Delta_1$  (siis  $\Delta_2 > \Delta_1 > \Delta t$ ), koska  $v$  oli suurempi kuin 0. Jos koelaitte on absoluuttiseen avaruuteen nähden liikkeessä suuntaan  $AC$ , niin valonsäteiden tulisi palata  $A''$ :uun eri aikoihin siten, että valonsäde  $B$ :n suunnasta palaa aikaisemmin kuin valonsäde  $C$ :n suunnasta. (Van Fraassen 1970, 145.)

Jos absoluuttinen avaruus siis olisi olemassa, ja koelaitte siihen nähden liikkeessä nuolen  $v$  suuntaan, niin silloin valonsäteiden paluiden hetket peiliin  $A$  eivät olisi samanaikaiset. Suoritettuaan tämän kokeen Michelson ja Morley kuitenkin huomasivat, että *valonsäteet palaavat aina samaan aikaan peiliin A*. Nyt ei tietenkään tiedetä, että maapallo on juuri  $AC$  linjan (nuolen  $v$ ) suuntaisessa liikkeessä absoluuttiseen avaruuteen nähden, mutta koska maapallon liikkeen suunta vaihtelee, niin tulisi ainakin joitakin eroavaisuuksia valonsäteiden paluiden hetkissä havaita. Näitä eroavaisuuksia ei kuitenkaan koskaan havaita, vaikka koe toistetaan eri aikoina ja maapallon liikesuunnan ollessa mikä tahansa.

Tulisiko tästä tuloksesta sitten päätellä, että absoluuttista avaruutta ei ole olemassa? Tämä päätelmä ei välttämättä seuraa, sillä Hendrik Lorentz esitti hypoteesin, että kappaleiden pituus muuttuu liik-

keen vaikutuksesta. Hänen mukaansa kappaleesta tulee sitä lyhyempi, mitä suurempi sen nopeus on. Tämä *pituuskontraktio* vaikuttaa vain liikkeen itsensä suunnassa, eli kyseisessä esimerkissä AC valokellon pituus lyhenee (koska liike oli AC:n suuntaista), mutta AB valokellon pituus pysyy ennallaan. Tämä AC valokellon pituuden lyheneminen selittää sen, miksi valonsäteet palaavat A:han samaan aikaan. Lorentzin mukaan pituuskontraktion suhde on  $\sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}$ , jolloin siis AC:n uusi pituus on  $AC \times \sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}$ . Pituuskontraktion suuruuden oletetaan siis olevan juuri sen mittainen, että se selittää valonsäteiden yhtäaikaisen paluun. (Van Fraassen 1970, 145–146.) Pituuskontraktion tapauksessa on huomattava, että sitä itseään ei selitetä millään tavalla, vaan se itse toimii *selittäjänä*. Tässä siis valonsäteiden yhtäaikainen paluu on *selitettävä asia* (explanandum), ja pituuskontraktio – joka ei itsessään välttämättä ole yhtään sen selkeämpi konsepti – on *selittävä asia* (explanan).

Michelsonin-Morleyn koe kehitettiin alun perin todistamaan eetterin (tai absoluuttisen avaruuden) olemassaolo, mutta sen tulokset eivät olleetkaan odotetun kaltaisia. Jos absoluuttisesta avaruudesta halutaan pitää kiinni, niin silloin on myönnettävä myös pituuskontraktion paikkansapitävyys. Suhteellisuusteoriassa (ja siis relativistisen avaruuden teorioiden mukaan) pituuskontraktio ymmärretään siten, että jostakin viitekehyksestä käsin kappale vaikuttaa lyhenevän. Pituuskontraktiota ei kuitenkaan havaita kappaleen mukana liikkuvasta viitekehyksestä, ja muista viitekehyksistä kontraktion suuruus vaihtelee kappaleen suhteellisen nopeuden mukaisesti. Suhteellisuusteorian mukaan kappaleella ei siis ole *absoluuttista pituutta* siinä mielessä, kuin absoluuttisen avaruuden teorioiden mukaan sillä on.

### 2.1.3 Aikadilataatio

Pituuskontraktiosta siis seuraa, että suoritettujen pituuden mittaukset ovat systemaattisesti vääriä. Esimerkiksi maantiemittauksessa käytetyt valomitat antavat siis vääriä tuloksia niiden välisen matkan absoluuttisesta pituudesta. Tästä ei tietenkään ole käytännön haittaa, sillä myös tie itsessään on kuitistunut samassa suhteessa, kuin mitä valomitat valehtelevat, mutta mikään mitta ei pysty mittamaan kappaleiden *absoluuttisia pituuksia*. Seuraavaksi tarkastellaankin sitä, miten ajan mittaukset suhtautuvat liikkeeseen absoluuttisessa avaruudessa, sillä myös niiden voisi olettaa olevan riippuvaisia liikkeestä, jos pituuskin on siitä riippuvainen.

*Fizeaun kokeessa* Michelsonin-Morleyn kokeen toinen valokello (tässä tapauksessa AB valokello) korvataan tavallisella mekaanisella kellolla. Mekaaniset kellot ovat harmonisia värähtelijöitä, joten niiden näyttämään aikaan ei liikkeen tulisi vaikuttaa. Toinen valokello säilytetään tässä kokeessa samanlaisena kuin Michelsonin-Morleyn kokeessa, joten mekaanisella kellolla voidaan nyt mitata, kuinka kauan valolla kestää yhdessä kiertomatassa peilistä A peiliin C ja takaisin (Jos koelaitte on paikallaan eetterissä, niin matka on ACA, ja jos se on liikkeessä, niin matka on AC'A''). Jos koelaitte olisi paikallaan absoluuttisessa avaruudessa, niin kiertomatkkaan ACA kulunut aika olisi  $\Delta t = \frac{ACA}{c}$ . Jos taas koelaitte olisi liikkeessä suuntaan AC nopeudella  $v$ , niin kiertomatkkaan AC'A'' kulu-  
van ajan laskettiin edellä olevan  $\Delta_2 = \Delta t / 1 - (\frac{v^2}{c^2})$ . Nyt on kuitenkin otettava huomioon valokellon pituuskontraktio, joten todellisuudessa kiertomatkkaan AC'A'' kuluukin aika  $\Delta_{2+\text{pituuskontraktio}} = \Delta t / \sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}$ . Joka tapauksessa kiertomatkkaan kulunut aika riippuu koelaitteen absoluuttisesta nopeudesta  $v$ . Koska tämä absoluuttinen nopeus vaihtelee maan liikkuesssa absoluuttisessa avaruudessa, niin mekaanisen kellon tulisi saada tulokseksi eri kestoja kiertomatkalle, kun koe suoritetaan useaan otteeseen. (Van Fraassen 1970, 147–148.)

Suoritettaessa kyseinen koe saadaankin tulokseksi (odotetusta poiketen), että mekaaninen kello näyttää aina, että kiertomatkkaan kuluu sama aika. Tämä mekaanisen kellon mittaama aika on aina  $\Delta t = \frac{ACA}{c}$ . Mekaaninen kello siis näyttää aina saman ajan kiertomatkalle, kuin mitä kiertomatka kestäisi, jos koelaitte olisi paikallaan absoluuttisessa avaruudessa. Lorentz ennusti myös tämän tuloksen, vaikka Fizeaun koe pystyttiinkin suorittamaan riittävällä tarkkuudella vasta myöhemmin. Lorentzin hypoteesi tämän kokeellisen tuloksen selittämiseksi oli *aikadilataatio*. Aikadilataation mukaan liikkeessä olevan kappaleen kokema aika hidastuu. Kellot siis käyvät hitaammin, eli jäävät jälkeen, kun ne ovat liikkeessä suhteessa absoluuttiseen avaruuteen. Tämän ajan hidastumisen oletetaan tapahtuvan suhteessa  $\sqrt{1 - (\frac{v^2}{c^2})}$ , jotta se selittäisi, miksi kiertomatkan mitataan aina kestävän ajan  $\Delta t$  verran. (Van Fraassen 1970, 145.)

Samaan tapaan kuin pituuskontraktionkin tapauksessa, myös aikadilataatio on havaintoja *selittävä* hypoteesi, jota ei itseään selitetä millään tavalla. Absoluuttisen avaruuden teorian joutuvat siis pituuskontraktion lisäksi myöntämään myös aikadilataation paikkansapitävyyden. Samalla huoma-



taan, millä tavalla ajatus *absoluuttisesta ajasta* on kantautunut absoluuttisen avaruuden teorian mukaan. Nyt on oletettava, että vain kappaleet, jotka ovat levossa suhteessa absoluuttiseen avaruuteen, kokevat absoluuttisen (tai todellisen) ajan kulun. Absoluuttisessa liikkeessä olevien kappaleiden ajan sanotaan olevan hidastunutta, eikä se vastaa tätä absoluuttista aikaa. Tällöin myös kaikki mitaukset kuluneesta ajasta ovat vääristyneitä. Suhteellisuusteoriassa absoluuttista avaruutta ei oleteta, eikä siten ole tarpeen olettaa myöskään absoluuttista aikaa. Yhdestä viitekehyksestä havaitaan toisen siihen nähden liikkeessä olevan viitekehysten ajan hidastuneen, mutta kumpikaan näistä viitekehyksistä ei ole ensisijainen toiseen nähden.<sup>2</sup> Mitään ensisijaista viitekehystä ei ole suhteellisuusteorian mukaan olemassa, eikä siten ole myöskään mitään ensisijaista ajan kulun nopeutta. Seuraavassa luvussa siirrytäänkin käsittelemään lähemmin suhteellisuusteorian aikakäsitystä.

## 2.2 Suhteellisuusteoria ja aika

Edellä käsiteltiin oikeastaan vain absoluuttisen avaruuden olemassaoloa, sillä klassiset teoriat aika-avaruudesta olettivat ajan olevan aina absoluuttinen. Nyt kuitenkin on huomattu – eikä vähiten aikadilataation ansiosta – että ajan kulku ei vaikutakaan olevan niin yksinkertaista kuin sen on oletettu olevan. Kaikki tietävät, mitä aika on, kunnes he joutuvat selittämään sen. Kuvittelemme ymmärtävämme intuitiivisesti ajan olemuksen, mutta samalla se ei kuitenkaan tunnu meistä selvältä, kun se pitäisi muotoilla sanoiksi. Modernissa fysiikassa ajalla tarkoitetaan neljättä aika-avaruuden ulottuvuutta, joka kuitenkin on kolmesta muusta jollakin erityisellä tavalla erilainen. Tärkeää on kuitenkin huomata, että vaikka ajallinen ulottuvuus on *erilainen* kuin avaruudelliset ulottuvuudet, niin se ei ole niistä *erillinen*. Tässä luvussa käsitelen sitä, mitä oikeastaan mittaamme, kun mittaamme aikaa, ja miten avaruuden ja ajan nähdään kietoutuvan suhteellisuusteoriassa yhteen. Aikaa ei siis enää nähdä absoluuttisena ja riippumattomana, vaan sen kulun huomataan riippuvan havaitsijasta ja erityisesti hänen liikkeestään suhteessa muihin havaitsijoihin.

### 2.2.1 Ajan mittaaminen

Arkielämässä pidetään itsestään selvyytenä, että tietyn pituinen ajallinen jakso on aina samanpituisen, eli sen kesto ei vaihtelee. Esimerkiksi sekunti on sekunti ja minuutti on minuutti, riippumatta siitä, milloin nämä aikajaksot tapahtuvat, tai kuka ihminen nämä kokee. Tätä seikkaa pidetään intuitiivisesti totena, olkoonkin että toisina päivinä aika tuntuu kulkevan hitaammin kuin toisina. Kui-

---

<sup>2</sup> Tästä toisesta viitekehyksestä katsottuna taas ensimmäisen viitekehysten aika on hidastunut, joten ajan hidastuminen havaitaan aina suhteessa mielivaltaisesti valittuun viitekehykseen.

tenkin nämä aikavälit on määriteltävä jollakin tavalla, aivan kuten metrin pituus on määriteltävä jotenkin konkreettisesti. Metrin tapauksessa meillä on määritelmänä metrin mitta Pariisissa, tai sittemmin valon nopeuteen tyhjiössä viittaava määritelmä. Miten sitten aikajaksojen pituudet tulisi määritellä? Kuinka pitkä aikaväli on sekunti, ja miten se voidaan mitata? Mistä tiedetään että sekunti on aina yhtä pitkä ja mihin fysikaaliseen tapahtumaan se tulisi sitoa?

Reichenbach (1958, 114) esittää, että on olemassa kaksi eri ajan mittaamiseen käytettävää tapaa: jaksolliset prosessit ja ei-jaksollisiin prosesseihin liittyvä spatiaalisen etäisyyden mittaaminen. Esimerkkinä edellisestä voisi olla maapallon pyörimisliike tai heilurin heilahdukset. Yhtä kokonaista maapallon pyörähdystä pidetään aina ajallisesti samanmittaisena ja tälle aikavälille annetaan nimi ”vuorokausi”. Tämä pyörähdys voidaan jakaa myös osiin, ja antaa esimerkiksi nimi ”tunti” sille aikavälille, jonka pituinen on  $1/24$  osa kokonaisesta pyörähdyksestä. Jälkimmäisestä tavasta – eli ei-jaksollisiin prosesseihin liittyvästä spatiaalisesta etäisyyden mittaamisesta – esimerkkinä olkoon valon liikkeen mittaaminen. Liikkeessä oleva kappale säilyttää nopeutensa, mikäli siihen ei kohdistu ulkoisia voimia, ja täten valon liike on aina yhtä nopeaa. Nyt voidaankin kutsua yhtä pitkiksi aikaväleiksi sellaisia intervaleja, joiden aikana valo liikkuu yhtä pitkän matkan.

Ajalliset mittaukset eivät välttämättä aina palaudu spatiaalisiin mittauksiin, vaan esimerkiksi jaksollisiin prosesseihin perustuva ajan mittaaminen on tietyissä tilanteissa täysin riippumaton spatiaalisista mittauksista (Reichenbach 1958, 115). Esimerkiksi heilurin tapauksessa ei tarvitse suorittaa mitään spatiaalista mittausta, vaikka heilurin heilahdukset määritellään ajallisesti yhtä pitkiksi. Heilurin yhden heilahduksen ajallinen kesto riippuu tunnetusti vain heilurin varren pituudesta, eikä tätä pituutta tarvitse tietää, kun kaikki heilahdukset määritellään saman kestoisiksi.

Aikaa mitattaessa mitataan siis aina jonkin prosessin kesto, eikä aikaa itseään. Täten ei voidakaan mitenkään tietää, että kaksi peräkkäistä aikaintervallia ovat tosiasiaassa yhtä pitkiä. Ajan kulku määritellään havaittavien prosessien kautta, eikä ajan kulkuun itseensä päästä käsiksi. Aikaintervallien keston yhdenmukaisuus riippuu siis tehdystä ajallisen keston määritelmästä, ja tämä määritelmä on tehtävä jommallakummalla, tai molemmilla (sikäli kuin ne ovat yhdenmukaisia), yllä mainituista tavoista (Reichenbach 1958, 116–117.)

Käytännössä siis ensin valitaan yhdenmukaiset aikaa määrittävät tekijät, kuten jokin tietty astelukku maapallon pyörintää sekä jokin tietty valon kulkema matka, ja sitten määritellään jokin aikamitta (vaikkapa sekunti) näiden kahden mukaisesti. Lisäksi voidaan rakentaa kelloja, joiden viisarin liike on myös yhdenmukainen näiden kahden aikamitan kanssa. Tällä tavoin voidaan niin sanotusti ”mitata aikaa” ja puhua siitä järkevällä tavalla. Tämä ajallinen määritelmä tehdään mieluummin monen yhdenmukaisen aikamitan mukaisesti, sillä silloin on olemassa jokin vertailukohta siltä varalta, että esimerkiksi maapallon pyörimisliike vaikuttaisi hidastuvan tai nopeutuvan. On kuitenkin pidettävä mielessä, että tämä määritelmä ajan mittaamiselle on täysin mielivaltainen. Maailmassa ei ole olemassa entiteettiä tai aikamittaa, joka voitaisiin vain löytää. Onkin siis vain tehtävä määritelmä, jossa annetaan nimi ”sekunti” jollekin intervallille, jonka määrää jokin kausaalinen prosessi, jonka uskotaan kestävän aina yhtä kauan aikaa. Toisin sanoen ajalla ei ole olemassa tiettyä koordinaattisteikkaa, vaan sellainen on luotava itse. Jos esimerkiksi ajan todellinen kulku nopeutuisi kaksinkertaiseksi, niin tätä muutosta ei olisi mahdollista huomata. Tämä johtuu siitä, että kaikki universumissa tapahtuva liike säilyttäisi saman vanhan suhteellisen nopeutensa.<sup>3</sup> Koska jokainen ajan mittari on liikkeeseen perustuva, niin tätä fundamentaalista aikaan kohdistuvaa muutosta ei voida havaita.<sup>4</sup>

### 2.2.2 Samanaikaisuus

Edellä käsiteltiin vain yhdessä avaruudellisessa paikassa tapahtuvien aikaintervallien yhdenmukaisuutta. Tarkoituksena on kuitenkin myöhemmin (luvussa 2.1.2.4) käsitellä myös toisistaan paikallisesti erillisten aikaintervallien yhdenmukaisuutta, eli ajan kulkua eri *inertiaalisissa systeemeissä*<sup>5</sup>. Jotta tähän tarkasteluun voidaan siirtyä, niin tarvitaan kuitenkin kahden paikallisesti erillisen tapahtuman samanaikaisuutta. Kun puhutaan samassa paikassa tapahtuvista tapahtumista, ovat nämä tapahtumat tietysti vain jonkin tietyn havaitsija mielestä samassa paikassa tapahtuvia. Tässä yhteydessä havaitsija ymmärretään inertiaaliseksi systeemiksi, joka siis voi olla myös havaitsijoiden joukko tai muu vastaava tasaisessa liikkeessä tai paikallaan oleva systeemi. Jokin toinen havaitsija, joka on edelliseen nähden liikkeessä, ei olisi ollenkaan sitä mieltä, että nämä tapahtumat tapahtuivat samassa avaruuden paikassa. Ensimmäinen on siis valittava jokin tietty viitekehys (eli inertiaalinen systeemi).

<sup>3</sup> Liikkeen absoluuttinen nopeus tietenkin muuttuisi, mutta koska tämä nopeus ei ole havaittavissa, niin sillä ei ole käytännön merkitystä.

<sup>4</sup> Huomattava on myös, että havainto- ja ajatusprosessimme koostuvat myös liikkeestä – oli se sitten perimmältään elektronien liikettä hermoissa tai jotakin muuta vielä perustavampaa.

<sup>5</sup> Inertiaalisella systeemillä tarkoitetaan systeemiä, jonka nopeus on vakio. Sen nopeus ei siis kiihdy eikä hidastu, eikä tämä systeemi tällöin koe inertiaalisia voimia.

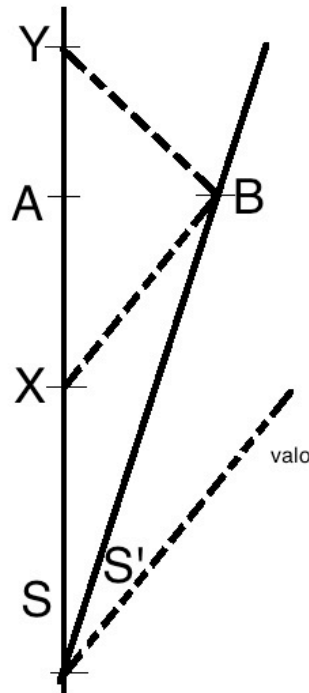
mi) johon sitoudutaan, ja vasta sen jälkeen voidaan mielekkäästi puhua kahdesta paikallisesti erillisestä tapahtumasta. Millä keinoilla sitten voidaan osoittaa, että kaksi spatiaalisesti erillistä tapahtumaa (esimerkiksi tapahtumat A ja B) ovat samanaikaiset?

Yhtenä vaihtoehtona on synkronoida kaksi kelloa, ja sitten siirtää kelloja siten, että toinen kelloista on *koinsidenttinen*<sup>6</sup> (coincident) toisen tapahtuman (A) kanssa, ja toinen kello on koinsidenttinen toisen (B) kanssa. Nyt voitaisiin merkitä muistiin, mitä aikaa kumpikin kello on näyttänyt sitä vastaavan tapahtuman (A ja B) kohdalla, tuoda kellot takaisin yhteen, ja verrata näitä aikoja toisiinsa. Nyt ei kuitenkaan ole selvää, että nämä kaksi kelloa ovat synkronoituja enää sen jälkeen, kun ne on siirretty toisistaan erilleen. Kahden kellon synkronointia voidaan tarkkailla vain, kun ne ovat keskenään samassa paikassa. Aikadilataatiosta johtuen kaksi kelloa, jotka ovat aluksi synkronoituja, mutta erotetaan toisistaan, ja kuljetetaan eri reittejä jälleen takaisin yhteen, eivät enää ole synkronoituja, mikäli reitit ovat eripituisia tai kellojen keskinopeus reitillä on eri (Van Fraassen 1970, 152–153). Tämän lisäksi ei ole mahdollista tietää, että kaksi erillään olevaa kelloa ovat synkronoituja, jollei tapahtumien samanaikaisuutta ole vielä selvitetty. Tätä samanaikaisuutta ollaan juuri selvittämässä, joten tämä synkronointimenetelmä johtaa kehäpäätelmään.

Toinen tapa selvittää kahden erillisen tapahtuman A ja B samanaikaisuus on lähettää signaali (esimerkiksi valonsäde) inertiaalisesta systeemistä S, joka kokee toisen tapahtuman (tässä esimerkiksi kokee A:n), tähän toiseen tapahtumaan B, ja heijastaa tämä signaali takaisin S:n maailmanlinjalle. Tällaista koetta kuvataan alla olevassa kuvassa (Kuva 2.2). Tässä kuvassa valonsäde on lähetetty tapahtumasta X tapahtumaan B, josta se heijastuu takaisinpäin, ja palaa systeemiin S tapahtumassa Y. Nyt jos oletetaan, että valo kulkee samaa nopeutta molempiin suuntiin, niin voidaan todeta A:n ja B:n olevan samanaikaisia, koska A sijaitsee X:n ja Y:n puolivälissä. Tällaista oletusta ei kuitenkaan voida tehdä, sillä valon nopeus on riippuvainen systeemin S absoluuttisesta nopeudesta, eli systeemin nopeudesta suhteessa absoluuttiseen avaruuteen. Jotta edellä mainittua menetelmää voitaisiin soveltaa, niin on tiedettävä valon nopeus sen kulkiessa vain yhteen suuntaan.

---

<sup>6</sup> Koinsidenssillä tarkoitetaan yhdistettyä samanaikaisuutta ja samanpaikkaisuutta.



Kuva 2.2 (Tapahtuma A määritellään tapahtuman B kanssa samanaikaiseksi)

Millä tavalla valon nopeus yhteen suuntaan mitataan? Nopeuden laskemiseen tarvitaan kaksi mittaustulosta: valon kulkeman matkan pituus (tässä esimerkissä matka X:stä B:hen tai B:stä Y:hyn), ja tämän matkan kulkemiseen kestänyt aika. Matkan kulkemiseen kestäneen ajan mittaamiseen taas tarvitaan ajanhetki, jolloin valo lähti alkupisteestä X (ajanhetki  $t_1$ ) ja ajanhetki, jolloin se saapui loppupisteeseen B (ajanhetki  $t_2$ ). Jotta intervallista  $(t_2 - t_1)$  olisi mielekästä puhua, on tiedettävä, että kellot, jotka antavat nämä arvot, ovat keskenään synkronoituja. Kellot ovat kuitenkin erillään toisistaan, joten jälleen tarvitaan spatiaalisesti erillisten tapahtumien samanaikaisuutta, jotta voitaisiin tietää kellojen näyttävän samaa aikaa. (Ks. Esim. Van Fraassen 1970, 152–153; Reichenbach 1958, 125–126.) Jälleen huomataan, että tämä samanaikaisuus oli juuri se, mitä oltiin määrittelemässä, joten kehämääritelmän uhalla tämäkään tapa ei onnistu tavoitteessaan.

Kolmas menetelmä tapahtumien samanaikaisuuden selvittämiseen perustuisi signaalien nopeuden kasvattamiseen. Jos X:stä lähetetään signaali B:hen, ja tämä signaali palaa systeemiin S tapahtumassa Y, niin B:n kanssa samanaikaisen tapahtuman on oltava X:n ja Y:n välissä. Jos nyt käytetään nopeampaa signaalia, niin voidaan X:n ja Y:n välistä aikaväliä pienentää. Jos käytössä olisi signaali, jonka nopeus olisi ääretön, niin lopulta X ja Y olisivat koinsidenttiset, ja tämä tapahtuma olisi

samanaikainen B:n kanssa. Suhteellisuusteorian tärkeimpiä tuloksia kuitenkin on se, että valo on nopein mahdollinen signaali, joten tällainen äärettömän nopea signaali ei ole ainakaan suhteellisuusteorian mukaan mahdollinen.<sup>7</sup>

Ei siis näytä olevan olemassa tapaa, jolla kahden toisistaan paikallisesti erillisen tapahtuman samanaikaisuus voitaisiin todentaa. Ongelma tulee erityisen selväksi, kun tapahtumien välinen etäisyys kasvaa hyvin suureksi. Oletetaan, että kaukaisen tähden sammuminen havaitaan tällä hetkellä katsottaessa yötaivaalle. Miten voidaan tietää, milloin tuo tähti on tosiasiasa sammunut? Tähti ei sammu samalla hetkellä, kun sen sammuminen havaitaan, sillä välimatkaa tähän tähteen voi olla valovuosia, joten tähden lähettämällä viimeisellä valonsäteellä on kestänyt huomattavan kauan (vuosia) saapua maahan asti. Nyt vaikka tähden ja maan välimatka tiedettäisiinkin, niin – kuten edellä huomattiin – valon nopeutta yhteen avaruuden suuntaan ei tiedetä, joten tähden sammumisen hetkeä ei voida tietää tarkalleen.

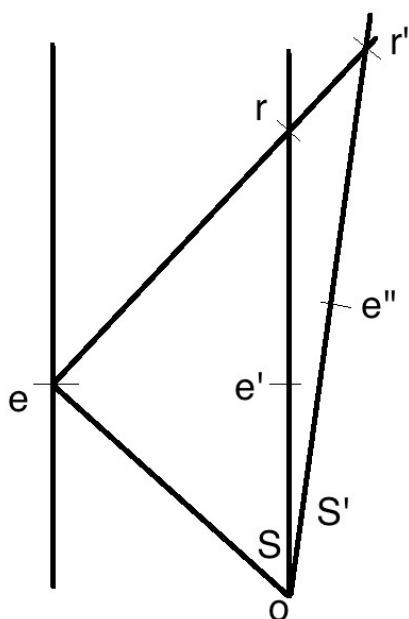
Einstein tulikin suhteellisuusteoriassaan tulokseen, että kahden paikallisesti erillisen tapahtuman samanaikaisuudelle ei ole olemassa fysikaalista perustetta. Hänen mukaansa kahden erillisen tapahtuman samanaikaisuus on puhtaasti konventionaalinen seikka. (Van Fraassen 1970, 155.) Tällä tarkoitetaan, että tehdään *sopimus*,<sup>8</sup> että valon nopeus on sama kaikkiin suuntiin siinä viitekehyksessä, missä kulloinkin ollaan. Tällöin esimerkiksi kuvan 2.2 tapauksessa B:n kanssa samanaikainen tapahtuma on se, joka on tasan X:n ja Y:n puolivälissä (eli tapahtuma A). Einstein (2003, 36) määrittelee samanaikaisuuden suhteellisuusteoriassa kaavalla  $t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1)$ . Missä  $t_1$  on valonsäteen lähetyshetki,  $t_2$  on valonsäteen heijastushetki ja  $t_3$  on hetki jolloin valonsäde palaa lähetyspisteeseen. Koska valon ajatellaan kulkevan samaa nopeutta joka suuntaan riippumatta systeemin absoluuttisesta nopeudesta, niin  $\varepsilon = \frac{1}{2}$ . Tämän kaavan avulla voimme laskea sen hetken, joka on samanaikainen B:n kanssa, mutta sen kanssa spatiaalisesti erillinen. Tätä sopimuksenvaraista valintaa  $\varepsilon = \frac{1}{2}$  kutsutaan *samanaikaisuuden konventionaalisuudeksi* (Van Fraassen 1970, 155).

<sup>7</sup> Suhteellisuusteorian mukaan massallisen kappaleen kiihdyttäminen valonnopeuteen vaatisi äärettömän määrän energiaa, joten mikään kappale ei voi saavuttaa valonnopeutta. Tämä voidaan nähdä esimerkiksi kaavasta  $E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , jossa nopeuden ( $v$ ) lähestyessä valonnopeutta ( $c$ ) energia ( $E$ ) lähenee ääretöntä. Massattomat kappaleet, kuten fotonit taas kulkevat valonnopeutta.

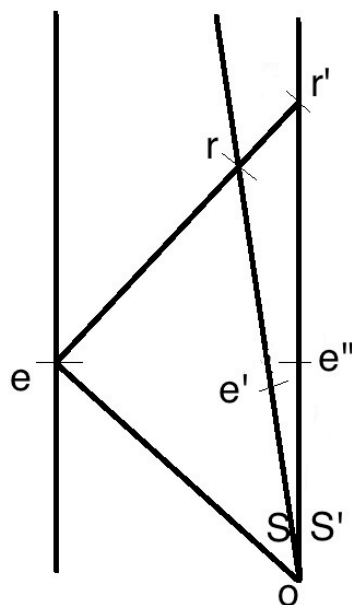
<sup>8</sup> Tämä sopimus sai tietenkin empiiristä tukea esimerkiksi Michelson–Morleyn kokeesta, jolla olikin osansa Einsteinin tekemään rohkeaan johtopäätökseen (Einstein & Infeld 1962, 148–149).

### 2.2.3 Viitekehykset ja samanaikaisuus

Kahden paikallisesti erillisen tapahtuman samanaikaisuus ei siis ole niin yksinkertainen asia, kuin voisi helposti kuvitella. Samanaikaisuutta ei voida perustaa mihinkään fysikaaliseen seikkaan, ja tämän vuoksi päädytäänkin vain konventionaaliseen määritelmään. Tämä määritelmä ei kuitenkaan riipu valitusta viitekehyksestä (inertiaalisesta systeemistä), vaan koska kaikki viitekehykset ovat samanarvoisia, niin  $\varepsilon = \frac{1}{2}$  kaikissa viitekehyksissä. Valon nopeus on siis yhtä suuri *kaikkiin suuntiin kaikissa viitekehyksissä*. Inertiaaliset systeemit voivat siis olla liikkeessä toisiinsa nähden, mutta jokaisen systeemin sisällä samanaikaisuus määritellään samalla tavalla. Millainen vaikutus viitekehysten samanarvoisuudella sitten on tapahtumien samanaikaisuudelle? Seuraavat kuvat (Kuvat 2.3 ja 2.4) toimivat havainnollistuksena siitä, kuinka samanaikaiset tapahtumat määritetään kahdesta eri viitekehyksestä S ja S'.



KUVA 2.3 (Samanaikaisuus S:n viitekehyksestä)



KUVA 2.4 (Samanaikaisuus S':n viitekehyksestä)

Kuvassa 2.3 havainnoitsija S, joka siis on omasta mielestään paikallaan, haluaa määrittää omalta maailmanlinjaltaan sen tapahtuman, joka on samanaikainen tapahtuman e kanssa. Hän siis lähettää valonsäteen tapahtumasta o tapahtumaan e, josta se heijastuu takaisin S:n maailmanlinjalle tapah-

tumaan  $r$ . Nyt  $S$  käyttää kaavaa  $t_2 = t_1 + \varepsilon(t_3 - t_1)$ , ja sijoittaa siihen sovitun  $\varepsilon = \frac{1}{2}$ , ja laskee siten tapahtuman  $e$  kanssa samanaikaiseksi tapahtuman  $e'$ . Myös havainnoitsija  $S'$  on omasta mielestään paikallaan, vaikka onkin liikkeessä  $S$ :ään nähden. Myös  $S'$  lähettää valonsäteen kohti  $e$ :tä tapahtumasta  $o$ , joka siis sijaitsee molempien systeemien maailmanlinjalla. Nyt  $S'$  on kuitenkin liikkeessä oikealle  $S$ :n suhteen, ja paluusignaali  $e$ :stä saapuu  $S'$ :n maailmanlinjalle vasta tapahtuman  $r'$  kohdalla. Jos siis  $S'$  laskee edellä annetun kaavan (ja sijoittaa siihen sovitun  $\varepsilon = \frac{1}{2}$ ) avulla sen tapahtuman, joka on samanaikainen  $e$ :n kanssa, saa hän tulokseksi tapahtuman  $e''$ . Eli  $e''$  sijaitsee  $S'$ :n viitekehyksestä tapahtumien  $o$  ja  $r'$  puolivälissä ja on samanaikainen  $e$ :n kanssa. (Sklar 1974, 257.)

Nyt kumpikaan havaitsija  $S$  tai  $S'$  ei havaitse  $e'$ :a ja  $e''$ :a samanaikaisiksi (Sklar 1974, 257). Itse asiassa kuvista 2.3 ja 2.4 voidaan helposti nähdä, että  $S$  havaitsee  $e''$ :n olevan  $e'$ :sta tulevaisuudessa, ja siten myös  $e$ :stä tulevaisuudessa. Jos siis  $S$  lähettäisi valonsäteen  $e''$ :uun, ja se heijastuisi takaisin  $S$ :n maailmanlinjalle, niin valonsäteiden lähtöksen ja paluun puoliväli tapahtuisi myöhemmin kuin  $e'$ . Vastaavasti  $S'$  havaitsee  $e'$ :n olevan  $e''$ :sta menneisyydessä, ja tällöin hän havaitsee  $e'$ :n tapahtuvan aikaisemmin kuin  $e$ . Kuvassa 2.4 havainnollistetaan sitä, miten  $S'$ :n viitekehyksestä tapahtumien kulku havaitaan. Siis  $e'$  havaitaan samanaikaiseksi (ja  $e''$  eriaikaiseksi)  $e$ :n kanssa  $S$ :n viitekehyksestä (kuva 2.3), kun taas  $e''$  havaitaan samanaikaiseksi (ja  $e'$  eriaikaiseksi)  $e$ :n kanssa  $S'$ :n viitekehyksestä.

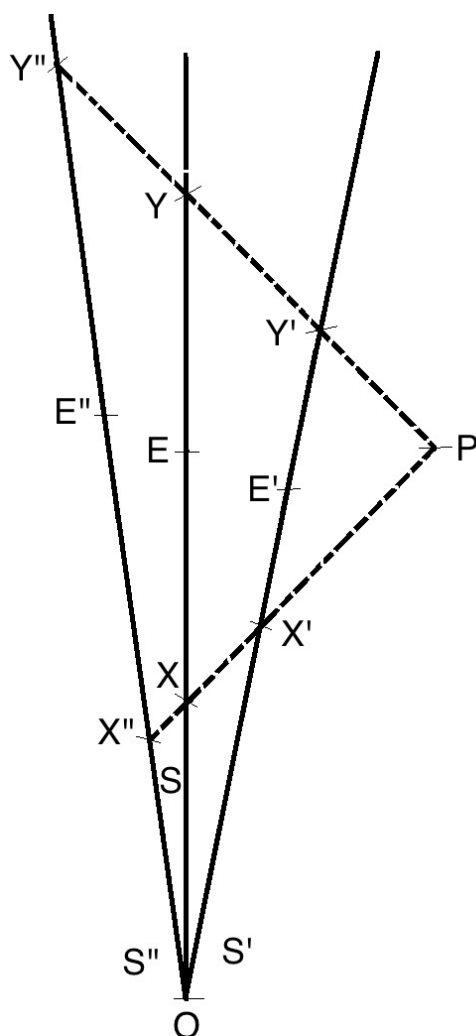
Tapahtumien samanaikaisuus ei siis ole viitekehyksestä riippumatonta, vaan eri inertiaalisissa systeemeissä (viitekehyksissä) mielletään eri tapahtumat samanaikaisiksi. *Samanaikaisuuden suhteellisuudella* tarkoitetaan juuri sitä, että tietty tapahtumapari voi olla samanaikainen jossakin viitekehyksessä, mutta eriaikainen toisessa (Van Fraassen 1970, 155). Absoluuttisen avaruuden kiellosta seuraa liikkeen suhteellisuus, mikä taas saa aikaan sen, että kaikki viitekehykset ovat samanarvoisia. Tästä samanarvoisuudesta ja samanaikaisuuden konventionaalisuudesta taas on seurauksena samanaikaisuuden suhteellisuus, joka on yksi aikajärjestyksen ongelman tärkeimpiä tekijöitä.

#### 2.2.4 Viitekehykset ja ajallinen kesto

Jos tapahtumien samanaikaisuus riippuu siitä, mistä viitekehyksestä näitä tapahtumia tarkastellaan, niin voidaan olettaa myös kahden tapahtuman välillä kuluvan ajan olevan suhteellista riippuen vii-



tekehyksestä. Tutkitaan seuraavaksi kuvan 2.5 avulla, miten kahden tapahtuman välinen havaittu aikaero ja niiden välinen havaittu välimatka korreloivat keskenään. Tässä kuvassa kolme keskenään suhteellisessa liikkeessä olevaa havaitsijaa ( $S$ ,  $S'$  ja  $S''$ ) laskevat kukin omasta viitekehyksestään tapahtumien  $O$  ja  $P$  välisen aikaeron ja niiden välisen välimatkan. Heistä kukin lähettää siis valonsäteen omalta maailmanlinjaltaan (tapahtumista  $X$ ,  $X'$  ja  $X''$ ) tapahtumaan  $P$ , josta se palaa takaisin kunkin maailmanlinjalle (tapahtumissa  $Y$ ,  $Y'$  ja  $Y''$ ). Nyt jokaisesta viitekehyksestä lasketaan valonsäteen lähettämisen ja paluun puoliväli (tapahtumat  $E$ ,  $E'$  ja  $E''$ ) samanaikaiseksi  $P$ :n kanssa. Nyt nämä tapahtumat eivät ole kenenkään viitekehyksestä samanaikaisia, vaan kaikista viitekehyksistä havaitaan, että  $E'$  tapahtuu ennen  $E$ :tä ja  $E$  ennen  $E''$ :a. Toisin sanoen  $S'$ :n viitekehyksestä  $O$ :n ja  $P$ :n välinen aikaväli on *pienempi kuin*  $S$ :n viitekehyksestä, ja  $S''$ :n viitekehyksestä tämä aikaväli on *suurempi kuin*  $S$ :n viitekehyksestä.



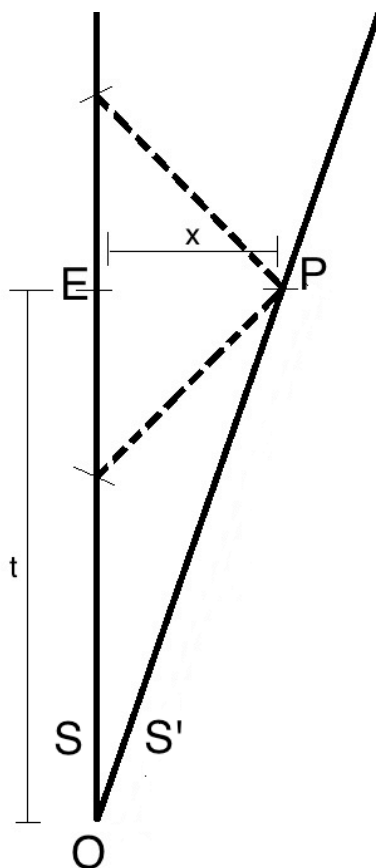
Kuva 2.5 (Kolmesta viitekehyksestä  $S$ ,  $S'$  ja  $S''$  havaitut välimatkat ja aikaerot  $O$ :n ja  $P$ :n välillä)

Seuraavaksi voidaan laskea, kuinka pitkä välimatka  $O:n$  ja  $P:n$  välillä on kustakin viitekehyksestä. Koska jokainen havaitsija on mielestään paikallaan, niin  $S:n$  mielestä  $O$  ja  $E$  tapahtuvat samassa paikassa,  $S':n$  mielestä taas  $O$  ja  $E'$  tapahtuvat samassa paikassa ja  $S'':n$  mielestä  $O$  ja  $E''$  tapahtuvat samassa paikassa. Täten esimerkiksi  $S$  havaitsee  $O:n$  ja  $P:n$  välimatkan olevan sama kuin  $E:n$  ja  $P:n$ . Näiden välimatka taas saadaan, kun  $X:n$  ja  $Y:n$  välinen havaittu aikaväli kerrotaan valonnopeudella ja jaetaan kahdella. Koska  $S'$  on  $S:$ ään nähden liikkeessä kohti  $P:tä$ , niin  $X':n$  ja  $Y':n$  välinen aikaväli on pienempi kuin  $X:n$  ja  $Y:n$ , jolloin myös  $E':n$  ja  $P:n$  välinen välimatka on pienempi kuin  $E:n$  ja  $P:n$ . Täten siis  $S':n$  viitekehyksestä *välimatka  $O:n$  ja  $P:n$  välillä on pienempi kuin  $S:n$  viitekehyksestä*. Vastaavasti  $S'':n$  viitekehyksestä  $O:n$  ja  $P:n$  välimatka on *suurempi kuin  $S:n$  viitekehyksestä*.

Huomataan, että jos kahden tapahtuman havaitaan viitekehyksestä 1 tapahtuvan lähempänä toisiaan kuin toisesta viitekehyksestä 2, niin silloin myös näiden tapahtumien aikaväli havaitaan viitekehyksestä 1 pienemmäksi kuin viitekehyksestä 2. Tästä huomiosta päästään yhteen suhteellisuusteorian tärkeimmistä hypoteeseista, joka on, että vaikka aika ja avaruus ovat suhteellisia (riippuvat viitekehyksestä), niin *aika-avaruus ei ole suhteellinen*. Tämän vuoksi voidaan aika-avaruudellinen välimatka (eli *aika-avaruusintervalli*, jota merkitään  $s^2$ ) määritellä olevan  $s^2 = \Delta x^2 - c^2 \Delta t^2$ ,<sup>9</sup> jonka voidaan osoittaa pysyvän vakiona eri viitekehyksien välillä (Ks. Esim. Reichenbach 1958, 177–179; Van Fraassen 1970, 149–150; Sklar 1974, 258–261; Feynman 1964, luku 17-2.) Toisin sanoen vaikka eri viitekehyksistä katsottuna kahden tapahtuman avaruudellinen välimatka havaitaan erisuuruiseksi, ja myös niiden ajallinen välimatka havaitaan erisuuruiseksi, niin tietty näiden yhdistelmä, eli aika-avaruudellinen välimatka (intervalli), havaitaan yhtä suureksi. Intervallin riippumattomuus johtuu siitä, että kun tietyistä viitekehyksestä havaittu tapahtumien aikaväli pienentyy (tai suurentuu) myös tästä viitekehyksestä havaittu välimatka pienentyy (tai vastaavasti suurentuu). Lisäksi tämän pienentymisen (suurentumisen) suhde huomataan olevan sellainen, että kun aikaväli pienenee (suurenee) yhdellä sekunnilla, niin havaittu välimatka pienentyy (suurentuu) 300 000 000 metrillä. Tämä selittää, miksi intervallin määritelmässä  $\Delta t$  kerrotaan valonnopeudella ( $c$ ) ja vasta sitten nostetaan toiseen potenssiin (siis  $(c\Delta t)^2 = c^2 \Delta t^2$ ).

<sup>9</sup> Tässä siis  $\Delta x$  on tapahtumien välinen havaittu välimatka (riippuen viitekehyksestä) ja  $\Delta t$  on tapahtumien välinen havaittu aikaväli (riippuen viitekehyksestä).

Nyt voidaan aika-avaruusintervallia käyttäen laskea, minkä aikavälin kaksi eri viitekehyksissä olevaa havaitsijaa havaitsevat kuluva kahden tapahtuman välillä. Esimerkkinä yhdestä tällaisesta laskusta toimii kuva 2.6. Tässä selvitetään, kuinka kauan aikaa eri viitekehyksissä olevat havaitsijat S ja S' kokevat kuluva tapahtumien O ja P välissä. Nyt S lähettää jälleen valonsäteen P:hen, ja laskee sen lähdön ja paluun keskiväliksi E:n, joka täten on hänen mukaansa samanaikainen P:n kanssa. S:n mielestä siis aikaväli O:n ja P:n välillä on sama kuin O:n ja E:n välillä eli  $t$ . Lisäksi S havaitsee, että O:n ja P:n välinen välimatka on  $x$  (joka siis on valonsäteen kiertomatkan kulunut aika kerrottuna valon nopeudella ja jaettuna kahdella). Nyt voidaan laskea O:n ja P:n välinen aika-avaruusintervalli, joka on  $s^2 = x^2 - c^2 t^2$ .



**Kuva 2.6 (O:n ja P:n välisen aikavälin määrittäminen intervallin avulla)**

Nyt täytyykin kysyä, kuinka pitkän ajan S' kokee kuluva O:n ja P:n välillä (merkitään tätä aikaa  $t'$ ). Huomataan, että S' kokee suoraan molemmat tapahtumat, joten hänen mukaansa niiden välimatka ( $\Delta x$ ) on 0. Siis O:n ja P:n välinen aika-avaruusintervalli on  $s^2 = 0 - c^2 t'^2 = -c^2 t'^2$ . Koska

intervalli on vakio viitekehyksien välillä, niin saadaan  $-c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2 \equiv c^2 t'^2 = c^2 t^2 - x^2 \equiv$

$$t'^2 = t^2 - \frac{x^2}{c^2} \equiv t' = \sqrt{t^2 - \frac{x^2}{c^2}} = t \sqrt{1 - \frac{x^2}{t^2 c^2}}. \text{ Nyt } S':\text{n suhteellinen nopeus (v) } S:\text{ään nähden on}$$

sen kulkema matka jaettuna sillä ajalla, joka  $S'$ :lla kesti kulkea tämä matka, eli  $v = \frac{x}{t} \equiv x = vt$ .

Sijoitetaan tämä edelliseen  $x$ :n paikalle ja saadaan  $t' = t \sqrt{1 - \frac{(vt)^2}{t^2 c^2}} = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Tästä huomataan,

että  $t'$  on pienempi kuin  $t$ , koska  $S'$ :n suhteellinen nopeus  $S$ :ään nähden ( $v$ ) on suurempi kuin 0.

Toisin sanoen  $S'$  kokee  $O$ :n ja  $P$ :n välillä kuluvan vähemmän aikaa, kuin mitä  $S$  kokee niiden välillä kuluvan. Lisäksi tämä suhteellisuusteorian ennustama ajan hidastumisen määrä on täsmälleen sama kuin luvussa 2.1.3 esitetyn *aikadilataation* määrä. Suhteellisuusteoria ennustaa siis saman tuloksen kuin aikadilataatio, mutta ilman absoluuttista aikaa tai avaruutta.

Nyt nähdään, mikä aikajärjestyksessä ja ajan kestossa on ongelmallista. Tapahtumien aikajärjestys ja niiden välillä kuluneen ajan määrä vaikuttaisi olevan subjektiivista ja riippuvan valitusta inertiaalisesta systeemistä (viitekehyksestä). Kukin toisiinsa nähden liikkeessä oleva havaitsija voi havaita samat tapahtumat aikajärjestykseltään erilaisiksi. Siis vaikka yhdestä viitekehyksestä ollaan sitä mieltä, että jokin tapahtuma  $E'$  on toiseen tapahtumaan  $E$  nähden menneisyydessä, on mahdollista löytää viitekehys, josta katsottuna  $E'$  onkin  $E$ :n tulevaisuudessa. Erityisesti kausaalista ajanteoriaa käsittelevässä luvussa 4 tarkoituksena onkin määritellä aikajärjestys uudelleen tavalla, jonka tuloksena olisi yhtenäinen – kaikista viitekehyksistä sama – kuva ajallisten tapahtumien järjestyksestä.

### 3 AJAN SUUNNAN ONGELMA

Tapahtumien aikajärjestyksen on nyt havaittu olevan ongelmallinen asia, mutta modernin fysiikan käsitykseen ajasta liittyy myös toinen perustavaa laatua oleva ongelma. Tätä ongelmaa kutsutaan yleisesti ajan suunnan ongelmaksi. Tämä ongelma tarkoittaa sitä, että maailmassa ei näytä olevan fysikaalista perustetta, jonka mukaan voitaisiin määritellä se, kumpi kahdesta tapahtumasta tapahtuu toista *ennen* ja kumpi toisen *jälkeen*. Tällaisella fysikaalisella perusteella tarkoitetaan yleisesti ottaen jotakin fysiikan lakia tai aika-avaruuden perustavaa rakennetta. Kuitenkin vaikuttaa siltä, että aika-avaruuden rakenne on samanlainen molempiin ajallisiin suuntiin, ja fysiikan laitkaan eivät vaikuta preferoivan toista ajan suuntaa toisen yli. Siltikin ajan suunnan havaitaan olevan intuitiivisesti selvä ja selkeästi yksisuuntainen. Tässä luvussa siirrytäänkin tarkastelemaan fysiikan lakeja ja prosesseja, joiden avulla voitaisiin määritellä, kumpi kahdesta tapahtumasta on toista ennen ja kumpi toisen jälkeen. Samalla tietysti tarkoituksena on saada (tällaisen ajan suunnan määrittävän prosessin avulla) selitetyksi myös inhimillisesti koettu ajan suunta.

#### 3.1 Ajankäännös-invarianssi

Fysikaalisten lakien *ajankäännös-invarianssilla* (time-reversal invariance) tarkoitetaan näiden lakien muuttumattomuutta sellaisessa operaatioissa, joka muuttaa ajan suunnan vastakkaiseksi sen alkuperäisen suunnan kanssa. Tällaisia operaatioita voidaan kuvitella useita erilaisia, ja keskustelu parhaasta muutosoperaatiosta onkin edelleen käynnissä. Tässä luvussa tarkoitukseni on esitellä ja arvioida erilaisia ajankäännös-muunnoksia, joita kirjallisuudessa on viime aikoina käsitelty.

Fysikaalista teoriaa sanotaan ajankäännös-invariantiksi, jos mikä tahansa teorian sallima *välittömien tilojen*<sup>10</sup> (instantaneous state) sarja ( $S_I, \dots, S_F$ ) voidaan kääntää sen ajankäännös-sarjaksi ( ${}^R S_F, \dots, {}^R S_I$ ), joka on myös teorian sallima (Malament 2004, 297). Maallikkokielellä ilmaistuna teoria on ajankäännös-invariantti, jos kaikki teorian (tai tarkemmin sanottuna teorian sisältämien fysikaalisten lakien) mukaiset tapahtumasarjat voidaan kääntää kulkemaan takaperin, ja myös nämä tapahtumasarjat ovat teorian mukaisia (eli eivät riko teorian sisältämiä lakeja). Klassisena esimerkkinä täl-

<sup>10</sup> Välittömällä tilalla tarkoitetaan fysikaalisen systeemin tilaa tietyssä ajanhetkenä. Tähän tilaan sisältyy esimerkiksi klassisessa mekaniikassa kappaleiden paikat ja (ainakin standardikäsityksen mukaan) kappaleiden nopeudet. Albertin ymmärrys välittömästä tilasta poikkeaa standardista, ja hän käyttäisikin termiä *dynaaminen tila* kuvaamaan tällaista tilaa, joka sisältää suureita, jotka tulee ajankäännöksessä kääntää operaattorilla  $R$ .

laisesta tapahtumasarjasta on pallon lento, kun se heitetään suoraan ylöspäin. Tässä voidaan kuvitella, että jos pallon nousu ja laskeutuminen otettaisiin nauhalle ja näytettäisiin takaperin, niin myös tämä takaperin näytettävä tapahtumien sarja olisi täysin luonnonlakien mukainen. Tämä esimerkki toimii klassisen mekaniikan lakien mukaisesti, ja klassinen mekaniikka onkin ajankäännös-invariantti teoria.

Edellisessä määritelmässä ajankäännös-invarianssista on huomattava, että välittömien tilojen järjestyksen muuttamisen lisäksi jokainen tila  $S$  muutetaan sen *ajankäännös-tilaksi*  ${}^R S$ . Tällainen tilojen muunnos on perinteisesti hyväksytty toimenpide ajankäännöksessä, mutta tämän luvun pääkohteena on tutkia sitä, onko kyseinen muunnos oikeutettu ja miten se tulisi tehdä (mitä suureita muunnoksessa tulee muuttaa). Perinteisesti katsottuna esimerkiksi newtonilaisessa mekaniikassa  ${}^R S$  on tila, jossa tilan  $S$  kappaleiden nopeudet on käännetty toisen suuntaisiksi, ja klassisessa sähkömagnetismissä  ${}^R S$  on tila, jossa tilan  $S$  magneettikentän suunta on käännetty. Toisin sanoen operaattori  $R$  kääntää kaikki ominaisuudet, jotka ovat riippuvaisia ajan suunnasta. Kysymys kuuluukin, mitkä ominaisuudet kääntyvät  $R$ :n vaikutuksesta (eli ovat ajan suunnasta riippuvaisia) ja mitkä eivät (fundamentaaliset aika-avaruuden objektit).

### 3.1.1 Albert ajankäännös-invarianssista

David Z. Albert esittää, että systeemin välittömät tilat tulisi määritellä siten, että ne ovat a) aidosti välittömiä (instantaneous) – eli ne ovat toisistaan loogisesti, konseptuaalisesti ja metafysisesti itsenäisiä – ja b) kokonaisia (complete) – eli niiden joukko sisältää kaikki fysikaaliset faktat maailmasta. Jos esimerkiksi otetaan newtonilainen fysiikka, niin tällöin Albertin määritelmästä seuraa, että ainoastaan kappaleiden paikat, eivätkä niiden nopeudet, sisältyvät välittömään tilaan. Tämän Albert sanoo johtuvan siitä, että nopeutta määriteltäessä joudutaan viittaamaan muihin tiloihin ja ajanhetkiin. Nopeus tiettyinä hetkenä voidaan määritellä vain raja-arvona kappaleiden paikkojen muutoksen tahdille. Täten nopeus ei voi sisältyä välittömään tilaan, sillä tällöin tila ei täyttäisi ehtoa a). Tässä tapauksessa tila olisi riippuvainen *kaikista* muista välittömistä tiloista, jotka ovat raja-arvon määrittämiseen tarvittavan mielivaltaisen intervallin välissä. (Albert 2000, 9–10.) Tämä on tietenkin täysin totta, jos oletetaan, että nopeus ei ole perustava ominaisuus, vaan riippuvainen kappaleiden pai-

kan muutoksesta ajan kuluessa (niin kuin fysikaaliset teoriat tekevät).<sup>11</sup> Albert ei kuitenkaan tunnu tiedostavan, että determinististen teorioiden kohdalla välitön tila, joka sisältää nopeuden, on riippuvainen myös *jokaisesta yksittäisestä* välittömästä tilasta. Tämä johtuu siitä, että jos tiedetään kappaleiden nopeudet ja paikat, niin determinististen teorioiden kohdalla voidaan määrittää kyseisten kappaleiden nopeudet ja paikat myös minä tahansa toisena ajankohtana. Täten kaksi yksittäistä välitöntä tilaa eivät myöskään täytä ehtoa a), vaan ovat riippuvaisia toisistaan.

Albert ei myöskään hyväksy edellä esitettyä Malamentin määritelmää ajankäännös-invarianssista. Hänen mukaansa teoria on ajankäännös-invariantti, jos välittömien tilojen sarja  $S_1, \dots, S_F$  voidaan kääntää kulkemaan järjestyksessä  $S_F, \dots, S_1$  ja myös tämä sarja on teorian lakien mukainen. Kuitenkin myös tämän näkemyksen mukaan newtonilainen fysiikka on ajankäännös-invariantti teoria. Tämä johtuu siitä, että Albertin näkemyksen mukaan kappaleiden nopeudet eivät sisälly välittömiin tiloihin, vaan koostuvat paikan muutoksesta ajan kuluessa, ja tällöin välittömien tilojen järjestyksen muuttuessa myös kappaleiden nopeudet kääntyvät. Kuitenkin muut – modernimmat – teoriat eivät ole tässä mielessä ajankäännös-invariantteja, sillä niissä välittömät tilat sisältävät suureita, jotka eivät ole suoraan sarjan tilojen järjestyksen funktioita (kuten nopeus on). (Albert 2000, 14.) Albertin määritelmä eroaa siis aiemmin esitetystä standardimääritelmästä siinä, että se ei muuta itse tiloja  $S$  ajankäännös-tiloiksi <sup>R</sup> $S$ . Tämä johtuu siitä, että Albert ei tunnusta välittömien tilojen sisältävän ajankäännöksessä kääntyviä ominaisuuksia. Albert (2000, 18) kutsuukin tällaisia tiloja – jotka sisältävät kääntyviä ominaisuuksia – *dynaamisiksi tiloiksi* (dynamical condition).

Albertin käsittely ei kuitenkaan osoita, että tällaista välittömien tilojen sarjaa  $S_1, \dots, S_F$  vastaava, eli sen kanssa täysin *samanlainen*, prosessi olisi mahdoton ajan kulkiessa toiseen suuntaan.<sup>12</sup> Jos teorian lait siis sanovat, että jonkinlainen prosessi voi tapahtua yhteen suuntaan ajassa, niin Albertin määrittelemänä *ajankäännös-epäinvariantit* teoriat sallivat *samanlaisen* prosessin tapahtuvan myös toiseen ajalliseen suuntaan. Jotta voitaisiin sanoa, että *vastaava* prosessi on mahdoton toiseen ajan

<sup>11</sup> Esimerkiksi Armstrong (1997, 77–78) käsittelee nopeuksien (ja muiden vektorisuureiden) sisällyttämistä välittömään tilaan. Hänen tuloksensa mukaan tällainen sisällyttäminen olisi toivottavaa, sillä se selittäisi muita hankalia metafysisiä ongelmia.

<sup>12</sup> Se sanoo vain, että tämä *sama* prosessi (eli välittömien tilojen sarja) ei voi tapahtua toiseen suuntaan. Ajatusta voidaan selkeyttää kuvittelemalla, että newtonilaisessa mekaniikassa kappaleiden nopeudet sisältyisivätkin välittömiin tiloihin. Tällöin toiseen suuntaan tapahtuvassa prosessissa  $S_F, \dots, S_1$  kappaleiden nopeudet olisivat kuitenkin alkuperäisen prosessin  $S_1, \dots, S_F$  suuntaisia, jolloin kappale liikkuisi toiseen suuntaan (esimerkiksi oikealle), kuin mihin sen nopeus osoittaa (vasemmalle). Tällainen prosessi on mieletön ja vastaava tilojen sarja ei kuvaa mitään tapahtumaa (Albert, 2000, 18).

suuntaan, niin onkin käytettävä – Albertin termin – *dynaamisia tiloja* ja niiden ajankäännös-tiloja. Nämä tilat sisältävät ajankäännös-operaattorin  $R$ , joka muuttaa tilan  $S$  sen ajankäännös-tilaksi  ${}^R S$ . Esimerkiksi Jill North nostaa tämän tekijän ratkaisevaksi asiaksi ajankäännös-invarianssin määrittelyssä. Hänen mukaansa emme oikeastaan ole kiinnostuneita ajankäännös-invarianssista sinänsä, vaan ajan luonteesta itsestään. Ajan luonteeseen taas voidaan päästä käsiksi ajankäännös-invarianssia tutkimalla. Ajatuksena on, että ajankäännös-epäinvariantit lait antavat syyn uskoa, että aika-avaruus on *ajallisesti suunnistettu* (temporally oriented)<sup>13</sup>. Jos lakeja ei voida muotoilla ilman, että ajalle oletetaan tietty suunta, niin silloin tukeakseen näitä lakeja on ajalla todella oltava tietty suunta. Jos taas lait voidaan muotoilla olettamatta ajan suunnasta mitään, niin silloin ne antavat syyn uskoa, että aika ei ole suunnistettu. (North 2008, 202–203.) Toisin sanoen jos lait olisivat ajankäännös-epäinvariantteja siinä mielessä, että tietyn *tyyppiset* prosessit toimivat vain yhteen suuntaan ajassa, niin ajalla vaikuttaisi olevan tietty suunta. Jos toisaalta kaikenlaisia prosesseja voi lakien mukaan tapahtua kumpaan suuntaan ajassa tahansa, niin silloin lait eivät tuota eroa ajan suuntien välille.

Ajankäännös-epäinvarianttien lakien halutaan siis antavan tietoa siitä, millainen ajan luonne on. Tässä tapauksessa Albertin määritelmä ajankäännös-invarianssista ei toimi, sillä sen mukaan myös ajankäännös-epäinvariantit teorit sallivat *kaikenlaisten* prosessien toimivan molempiin suuntiin ajassa. Tällöin onkin käytettävä aiemmin esitettyä standardimääritelmää, jossa tilojen  $S$  ajankäännös-sarja sisältää ajankäännös-tilat  ${}^R S$ . Nyt kysymys kuuluukin, millaisia ominaisuuksia/suureita ajankäännös-operaattori  $R$  kääntää. Tavanomaisesta poiketen Albert esittää esimerkiksi, että magneettikenttien<sup>14</sup> suunta ei käänny ajankäännöksessä, sillä magneettikentät eivät ole minkään objektin muutosnopeuksia. Hänen mukaansa vain nopeudet vaihtavat suuntaa ajankäännöksessä, eli operaattori  $R$  kääntää vain nopeuksia. Toisin sanoen tilan  $S$  ja tilan  ${}^R S$  magneettikentät ovat Albertin teoriassa samansuuntaiset. Tästä seuraa Albertin mukaan, että vaikka klassisen sähkömagnetismin mukaan tapahtumasarja  $S_1, \dots, S_F$  olisi lakien mukainen, niin sen ajankäännös-sarja  ${}^R S_F, \dots, {}^R S_1$  ei ole. Täten sähkömagnetismi ei ole ajankäännös-invariantti teoria, ja sen pitäisi tehdä ero ajan suuntien välillä. (Albert 2000, 20–21.)

<sup>13</sup> Katso luku 3.3 aika-avaruuden ajallisesta suunnistuvuudesta.

<sup>14</sup> Magneettikenttä (niin kuin sähkökenttäkin) ulottuu kaikkialle, ja sitä voidaan kuvata vektorikenttänä, jossa siis jokaiseen pisteeseen voidaan liittää yksikäsitteinen vektori, joka kuvaa magneettikentän suuntaa (vektorin suunta) ja sen voimakkuutta (vektorin pituus) tässä pisteessä.



### 3.1.2 Kritiikki Albertin versiota vastaan

Albertin versio ajankäännös-invarianssista on nostanut paljon kritiikkiä, ja useimmat vastustajat ovat sitä mieltä, että hänen ymmärryksensä ominaisuuksista, jotka R kääntää, on puutteellista. Esimerkiksi Earman huomauttaa, että magneettikentät syntyvät sähkölatauksien liikkeestä, ja näiden latausten liike tulee käännetyksi ajankäännös-operaatioissa. Tästä seuraa hänen mukaansa, että ajankäännös-operaatio kääntää myös magneettikenttien suunnan, eli toisin sanoen vektorikentän (joka kuvaa magneettikenttää) vektorit muuttavat suuntaansa ajankäännöksessä. (Earman 2002, 247.) Earmanin mukaan siis myös klassinen sähkömagnetismi on ajankäännös-invariantti, eikä erottele ajan suuntia toisistaan.

Myös David Malament on argumentoinut magneettikenttien kääntymisen puolesta. Hän esittää, että magneettikentät on nähtävä *aksiaalisina vektorikenttinä*<sup>15</sup>, jossa magneettikentän määrittävä aksiaalinen vektori on ajan suuntavektorin ja avaruuden suuntavektorin (pariteetin) ristitulo. Koska aksiaalisten vektorien suunta määräytyy oikean käden säännön mukaisesti, niin magneettikentän on käännettävä, kun ajan suunta kääntyy. Malament tähdentää, että jos magneettikentät ovat aksiaalisia vektorikenttiä, niin meillä ei voi yksinkertaisesti olla magneettikenttää, ennen kuin olemme määrittäneet ajan (ja avaruuden) suunnan. (Malament 2004, 314.) Ajan suunta siis joudutaan määrittämään ennen kuin magneettikenttää voidaan postuloida. Tämä johtuu siitä, että ajan suunta kertoo sähkölatausten liikesuunnan, josta magneettikenttien suunnat riippuvat. Tässä on huomattava, että Malamentin mukaan myös avaruuden suunta – tai avaruuden kätisyys eli pariteetti – on määritettävä ennen kuin magneettikenttää (ja sen suuntaa) voidaan postuloida. Avaruuden kätisyyden (pariteetin) muunnoksessa avaruudesta tehdään sen peilikuva, jolloin myös sähkölatausten suunta jälleen vaihtuu. Magneettikentän aksiaalisvektorisesta luonteesta johtuen myös pariteetinkäännös muuttaa magneettikenttien suunnan. Tästä seuraa, että jos molemmat – aika ja pariteetti – käännetään samalla kertaa, niin silloin magneettikenttien suunta pysyy samana. Sähkömagnetismi on siis invariantti teoria, kun suoritetaan *sekä* ajan- *että* pariteetinkäännös, mutta epäinvariantti, jos suoritetaan vain toinen. (Malament 2004, 312–313.)

---

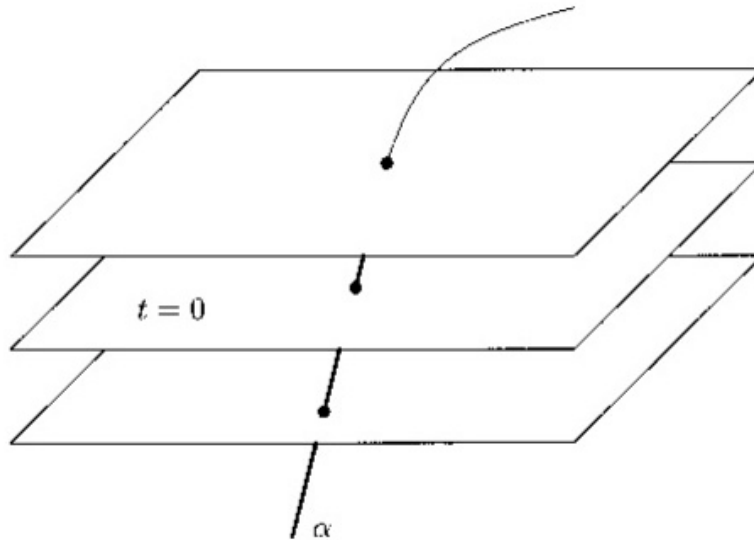
<sup>15</sup> Aksiaalinen vektori on kahden tason määrittävän vektorin ristitulo, ja se on tätä tasoa vastaan kohtisuorassa. Tasoa vastaan kohtisuorassa on tietenkin aina kaksi vektoria, mutta oikean käden sääntö määrittää, kumpaan suuntaan aksiaalinen vektori osoittaa, kun kahden tason määrittävän vektorin suunnat tiedetään.

Earmanin ja Malamentin kritiikit kohdistuvat Albertin ajatukseen, että koska magneettikentät eivät ole muutosnopeuksia, niin niiden on oltava *fundamentaalisia* ominaisuuksia välittömissä tiloissa. Tällöin magneettikentät vain yksinkertaisesti ovat tiettyä ajanhetkenä sellaisia kuin ne ovat – samalla tavalla kuin kappaleiden paikat vain ovat välittömässä tilassa tietyntylaiset –, eivätkä siis voi muuttua ajankäännöksessä. Tämä ajatus johtaa siihen, että Albert ei näe muita mahdollisia tapoja, joilla ajankäännös voi välillisesti vaikuttaa aika-avaruuden ominaisuuksien (kuten magneettikenttien) suuntiin. Millä tavoin sitten on mahdollista saada selville, mitkä ominaisuudet ovat sellaisia, että ne kääntyvät ajankäännöksessä? Seuraavaksi esitellään kaksi hieman toisistaan poikkeavaa tapaa suorittaa ajankäännös ja arvioidaan näitä kriittisesti. Molempien tarkoituksena on kuitenkin esittää konkreettisia metodeja, joiden avulla voidaan selvittää, mitä ajankäännöksessä tapahtuu, ja mitkä ominaisuudet ajankäännös-operaattorin  $R$  tulee kääntää ja mitkä jättää ennalleen. Tällä tavoin on tarkoituksena selvittää, mitkä teorialat ovat ajankäännös-invariantteja ja mitkä mahdollisesti eivät.

### 3.1.3 Ajankäännös-operaatio

Ajankäännökset suoritetaan neliulotteisessa aika-avaruudessa, jolloin niiden geometrinen kuvaus on sellainen, jossa kolmiulotteinen avaruus on supistettu kaksiulotteiseksi ja aika on kuvattu kolmantena ulottuvuutena. Aika-avaruuden objekteja (kuten tapahtumia, kappaleita, *maailmanlinjoja*<sup>16</sup> ja kenttiä) kuvataan tällöin geometrisilla objekteilla (kuten pisteillä, viivoilla ja vektoreilla). Nyt mikä tahansa, jonkin teorian mukainen, prosessi aika-avaruudessa voidaan kuvata kolmiulotteisesti kuvan 3.1 esittämällä tavalla. (Kuvassa 3.1 on kuvattu mahdollisimman yksinkertainen prosessi eli yhden partikkelin maailmanlinja  $\alpha$ ). Tässä kuvassa ei ole vielä sitouduttu kumpaankaan ajan suuntaan, jolloin partikkelin maailmanlinja  $\alpha$  voidaan määrittää antamatta sille kuitenkaan suuntaa. Lisäksi kuvan 3.1 *aikaviipaleiden* (time slice) järjestystä ei tarvitse vielä määrittää. (Earman 2002, 249–250.)

<sup>16</sup> Maailmanlinjalla tarkoitetaan yhden pisteen piirtämää linjaa aika-avaruudessa. Jotakin kappaletta vastaava maailmanlinja määrittää siis kaikki aika-avaruuden pisteet, jotka tämä kappale kokee historiansa aikana. Tavallaan se on jonkin persistoivan kappaleen neliulotteinen (aika-avaruudellinen) kuvaus.

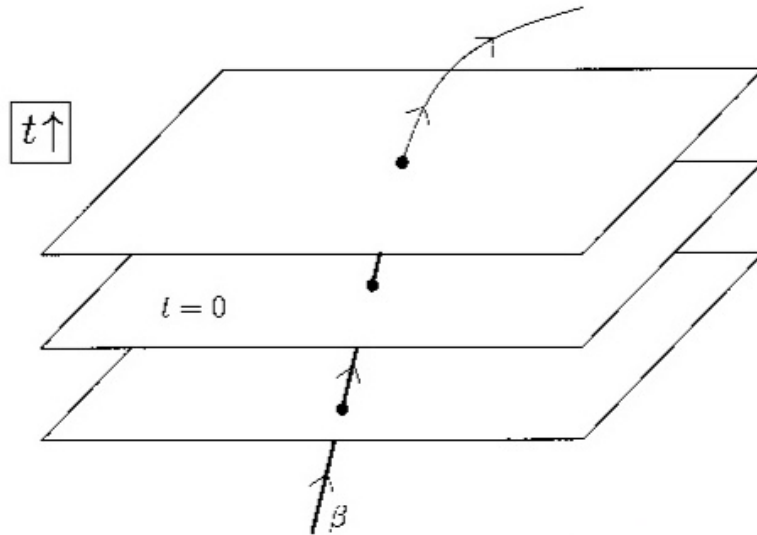


Kuva 3.1 (Partikkelin historia, eli maailmanlinja,  $\alpha$  ajallisesti ei-suunnistetussa aika-avaruudessa.)

Kun ajan suunta valitaan, niin partikkelin maailmanlinjalle voidaan määrittää suunta, ja aikaviipalet voidaan laittaa ajalliseen järjestykseen. Ajan suunnan valinta tapahtuu valitsemalla jompikumpi kahdesta, jatkuvasta, *ajankaltaisesta*<sup>17</sup> (timelike) vektorikentästä aika-avaruudessa tulevaisuuden suuntaiseksi vektorikentäksi. (Earman, 2002, 249). Ajankaltaisella vektorikentällä tarkoitetaan, että jokaiseen aika-avaruuden (tässä kolmiulotteinen kuvaus) pisteeseen on liitetty ajankaltainen vektori ja että kaikki nämä vektorit osoittavat samaan aikasuuntaan (jos tällainen ajankaltainen vektorikenttä on olemassa, niin silloin aika-avaruus on *ajallisesti suunnistuva*<sup>18</sup>). Suunnistuvassa aika-avaruudessa ajankaltaisia vektorikenttiä on aina kaksi, joista toinen osoittaa menneisyyden ja toinen tulevaisuuden suunnan. Tässä siis tehdään valinta kahden mahdollisen ajan suunnan välillä, ja määrittellään tulevaisuuden suunnaksi toinen näistä vektorikentistä. Halutun ajan suunnan (vektorikentän) valinnan jälkeen partikkelin historia  $\beta$  on kuvan 3.2 kaltainen (Earman 2002, 250).

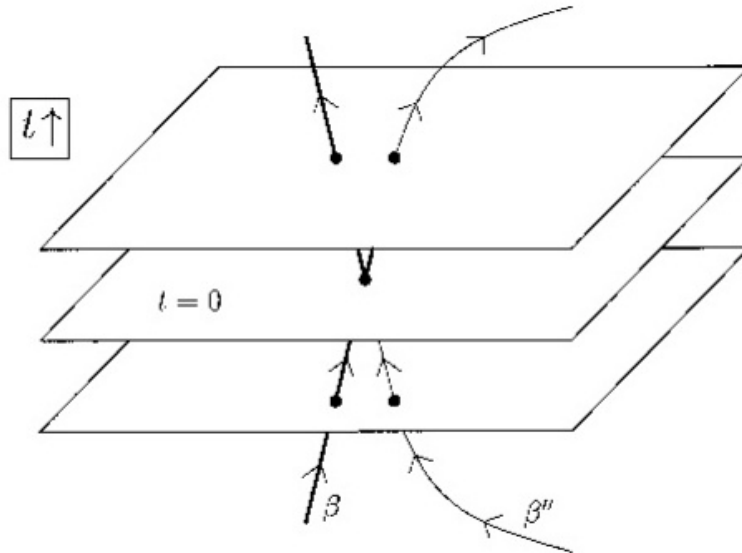
<sup>17</sup> Ajankaltaisella vektorilla tarkoitetaan vektoria, jonka alkupiste ja loppupiste ovat kausaalisesti yhdistettäviä. Ajankaltaisen vektorin on siis pysyttävä sen alkupisteestä lähtevän valokartion sisällä. (Tapahtuman X valokartiolla tarkoitetaan siitä piirrettyjä aika-avaruusdiagrammin kahta kartiota, joiden sivuina toimivat valonsäteet. Toinen kartio osoittaa menneisyyteen ja sisältää siis tapahtumat, joista on kausaalinen yhteys X:ään, ja toinen kartio osoittaa tulevaisuuteen, ja sisältää tapahtumat, joihin X:stä on kausaalinen yhteys. Yhdessä nämä kartiot muodostavat siis tiimalasin mallisen valokartion tapahtumalle X.) Jos vektori ei pysy valokartion sisällä, niin silloin kyseessä on *avaruudenkaltainen* (spacelike) vektori, ja sen lähtö- ja päätepisteiden välillä ei voi olla kausaalista yhteyttä. Myöhemmin tullaan huomaamaan, että keskenään avaruudenkaltaiset tapahtumat ovat samanaikaisia (ainakin kausaalisen ajanteorian mukaan).

<sup>18</sup> Luvussa 3.3 käsitellään tarkemmin ajallista suunnistuvuutta.



Kuva 3.2 (Partikkelin historia  $\beta$ , kun ajan suunta on valittu: aika  $t$  kasvaa ylöspäin, ja partikkeli liikkuu vasemmalta oikealle.)

Jill North esittää, että ajankäännös voidaan suorittaa kahdella eri tavalla: *standardimuunnoksella* ja hänen termiään käyttäen *Malamentin muunnoksella* (David Malamentin esittämän version mukaan). (North 2008, 206–208 ja 211–212.) Ajankäännöksen standardimuunnoksessa aika-avaruuden fundamentaaliset objektit (pois lukien ajan suunta, joka kylläkin voidaan ymmärtää vektorikenttänä) peilataan halutun aikaviipaleen suhteen. Tässä muunnoksessa objektien paikat vaihtuvat paikoista  $(t, x, y, z)$  paikkoihin  $(-t, x, y, z)$ . (North 2008, 210.) Kuvassa 3.3 maailmanlinja  $\beta''$  on standardi ajankäännös maailmanlinjasta  $\beta$ . Tässä ajankäännöksessä peilaus on suoritettu aikaviipaleen  $t=0$  suhteen.



Kuva 3.3 (Partikkelin historia  $\beta$  ja sen standardimuunnoksella tuotettu ajankäännös  $\beta''$ .)

Standardimuunnoksen mukaan teorian lait ovat ajankäännös-invariantteja, jos ne salliessaan kuvan 3.3 historian  $\beta$  sallivat myös historian  $\beta''$ . Kuvasta 3.3 huomataan, että  $\beta''$ :n suuntanuolet osoittavat ylöspäin. Tämä geometrinen havainnollistus vastaa maailmanlinjan (historian) jokaiseen pisteeseen liitettävän *nelinopeuden*<sup>19</sup> (four-velocity) kääntämistä toisen suuntaiseksi. Koska nelinopeus on maailmanlinjan pisteen tangenti, niin niitä on aina kaksi yhtä maailmanlinjan pistettä kohden (yksi kumpaankin ajan  $t$  suuntaan). Itse asiassa, koska nelinopeudet ovat tangenteja, niin ne voidaan määritellä vasta kun ajan suunta on kiinnitetty. (North 2008, 211.)

Nelinopeudet eivät siis ole aika-avaruuden fundamentaalisia objekteja, eli ne eivät ole olemassa ajan suunnasta riippumattomina olioina. Tämän vuoksi standardimuunnos ei peilaakaan niitä suoraan aikaviipaleen yli. Jos se peilaisi nelinopeudet samalla tavalla kuin fundamentaalit objektit, niin kuvan 3.3 historian  $\beta''$  nuolet olisivat toisen suuntaiset. Koska niiden suunta kuitenkin riippuu valitusta ajan suunnasta, niin nelinopeudet osoittavat aina samaan suuntaan kuin aika  $t$ . Kuvasta 3.3 käy hyvin selväksi, etteivät maailmanlinjan  $\beta''$  nuolet voisi osoittaa toiseen suuntaan, jos tarkoituksena on esittää  $\beta$ :n historia ajallisesti käännettynä. Koska nelinopeudet kussakin maailmanlinjan pisteessä kääntyvät standardimuunnoksessa, niin tällöin kääntyvät tietenkin myös kaikki muut ominaisuudet.

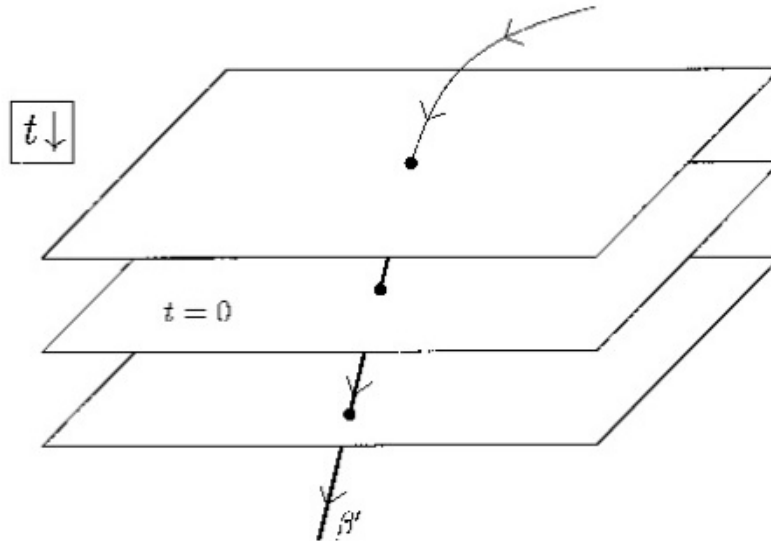
<sup>19</sup> Nelinopeudella tarkoitetaan jokaiseen maailmanlinjan pisteeseen liitettävää vektoria, joka kertoo välittömän (instantaneous) nopeuden neliulotteisessa aika-avaruudessa. Partikkelin nelinopeus tietyssä pisteessä on siis maailmanlinjan pisteen tangentin suuntainen vektori.

det, jotka johtuvat nelinopeuksista. Tällainen ominaisuus on esimerkiksi edellä keskustelun aiheena ollut magneettikenttien suunta. Magneettikenttien suunta muuttuu, koska kaikkien partikkelien – myös sähkölatauksien, jotka synnyttävät magneettikentät – suunta vaihtuu. Kuvasta 3.3 nähdään selkeästi, että  $\beta''$ :a vastaava partikkeli liikkuu ajankäännöksen jälkeen oikealta vasemmalle, kun  $\beta$ :aa vastaava partikkeli liikkuu vasemmalta oikealle.

Standardimuunnos saattaa vaikuttaa epäluonnolliselta, koska siinä manipuloidaan objekteja, jotka eivät kirjaimellisessa ajankäännöksessä muuttuisi. Malamentin muunnos toimiikin luontevampana vaihtoehtona standardimuunnokselle, sillä siinä objektit säilyvät ennallaan, eikä maailmanlinjojen peilauksia tarvita. Malamentin muunnos (eli kirjaimellinen ajan suunnan käännös) muuttaa kuvan 3.2 tilan tilaksi, joka näyttää kuvalta 3.4 (Earman 2002, 250–251). Tässä ainoat muutokset on tehty ajan suunnalle (se kasvaa nyt alaspäin) ja nelinopeuksille (nuolet ovat muuttaneet suuntaansa). Mihinään fundamentaalsiin objekteihin ei ole koskettu tässä muunnoksessa. Silti nelinopeuksien suunta kääntyy ajan kanssa samansuuntaiseksi, koska edellä huomattiin, että nelinopeudet oli määritetty vain kun ajan suuntaan oli sitouduttu. Nyt siis ajan suunta käännetään, jolloin myös nelinopeudet kääntyvät. Nelinopeuksien kääntymisestä johtuen historian  $\beta'$  nuolet kääntyvät osoittamaan alaspäin (eli samaan suuntaan kuin aika  $t$ ). Jälleen huomataan, että myös partikkelin liikesuunta on muuttunut ja kulkee oikealta vasemmalle, kuten standardimuunnoksessa tapahtui partikkelille  $\beta''$ .<sup>20</sup> Siis myös Malamentin muunnoksessa esimerkkinä olleet magneettikenttien suunnat kääntyvät, koska sähkölatauksien liikesuunta muuttuu.

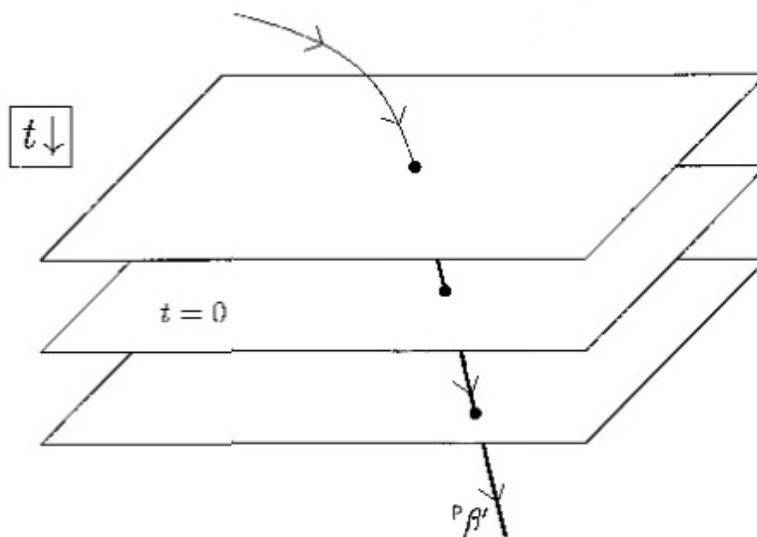
---

<sup>20</sup> Huomaa, että aika kulkee nyt alaspäin ja myös nelinopeudet osoittavat alaspäin, joten partikkeli lävistää ensin ylimmän aikaviipaleen, sitten aikaviipaleen  $t=0$  ja vasta viimeisenä alimman aikaviipaleen.



Kuva 3.4 (Malamentin muunnoksella tehty ajankäännös partikkelin historiasta  $\beta'$ . Tässä muunnoksessa ajan suunta on käännetty ja aika  $t$  kasvaa alaspäin.)

Havainnollistuksena edellisessä luvussa käsitellystä ajan- ja pariteetinkäännöksestä toimii kuva 3.5. Ajan- ja pariteetinkäännöksen jälkeen partikkelin historia vastaisi  ${}^P\beta'$ :a. Tästä kuvasta huomataan, että  ${}^P\beta'$  kuvaa historiaa, jossa partikkeli liikkuu samaan suuntaan kuin alkuperäisessä kuvan 3.2 historiassa  $\beta$  (eli vasemmalta oikealle). Täten myöskään sähkölatausten liikesuunta ei muutu, jolloin magneettikentät eivät vaihda suuntaansa. Tämä havainnollistaa Malamentin (2004, 312–314) väitettä, että magneettikenttien suunta riippuu ajan suunnan ja avaruuden suunnan (pariteetin) valinnasta, eikä sitä voida määrittää, ennen kuin molempiin on sitouduttu.



**Kuva 3.5 (Partikkelin historia  $\beta'$ , joka vastaa pariteettikäännöksen läpikäynyttä historiaa  $\beta'$  (Ks. Kuva 3.4), tai ajan- ja pariteetinkäännöksen läpikäynyttä historiaa  $\beta$  (Ks. Kuva 3.2).)**

Ajankäännöksen voi siis suorittaa kahdella eri tavalla, mutta kumpi kahdesta muunnoksesta sitten on parempi? Esimerkiksi North argumentoi Malamentin muunnoksen paremmuuden puolesta. Hän huomauttaa muun muassa, että standardimuunnoksessa täytyy olettaa, että lait toimivat samalla tavalla kaikkina ajan hetkinä. Mikään tunnettu laki ei ainakaan nykytietämyksen mukaan muutu ajan kuluessa, mutta Malamentin muunnoksessa ei jouduta tekemään tällaista oletusta. Malamentin muunnos toimii myös paremmin indeterminististen teorioiden kanssa, sillä siinä tietty prosessi säilyy tiukasti *samana* prosessina, kun standardimuunnoksessa prosessi on vain *samanlainen* kuin alkuperäinen. Tällöin joudutaan olettamaan, että jos prosessin tilat ovat samat, niin ne kehittyvät samalla tavalla jatkossakin. Lisäksi Malamentin muunnos toimii yhtä hyvin niin kaarevissa aika-avaruuksissa kuin tasaisissakin. Standardimuunnoksessa meidän täytyy peilata objekteja aikaviipaaleen suhteen, mikä vaatii, että pystymme mittaamaan kaarevassa aika-avaruudessa kaksi keskenään yhtä pitkää matkaa peilaavasta aikaviipaleesta katsoen ja samalla pitämään objektien väliset etäisyydet ennallaan. Kaarevassa aika-avaruudessa ei voida käyttää suoria linjoja etäisyyksien mittamiseen, vaan tällöin on käytettävä geodeettisia linjoja. Geodeettiset linjat voivat kuitenkin esimerkiksi leikata, jolloin kaksi erillistä peilattavaa pistettä voisi peilautua samaan yhteen pisteeseen. Northin mukaan tärkein argumentti Malamentin muunnoksen paremmuudesta seuraa siitä, että standardimuunnos muuttaa *spatiotemporaalisen kätisyyden*<sup>21</sup> peilattavissa objekteissa.<sup>22</sup> Tästä johdun emme voi tietää standardikäännöksen tehtyämme, kumpi aiheutti lain mahdollisen epäinvarianssin: ajankäännös vai objektien spatiotemporaalisen kätisyyden vaihtuminen. (North 2008, 218–222.)

Malamentin muunnos saattaa siis vaikuttaa suotavammalta kuin standardimuunnos, mutta on yksi syy, miksi standardimuunnos on pysynyt standardina: sen avulla voidaan *aktuaalisesti* testata teorian ajankäännös-invarianssia. Esimerkiksi Earman (2002, 250) huomauttaa, että ”emme voi aktuaalisessa maailmassamme muuttaa ajan suuntaa, tai tarkistaa ajankäännös-invarianssia liikkumalla ku-

<sup>21</sup> Kätisyydellä tarkoitetaan sitä, että objekti voi olla muodoltaan sellainen, että sitä ei voi muuttaa peilikuvakseen normaalein muunnoksin (kiertämällä ja liikuttamalla). Esimerkiksi oikeaa kättä ei voi muuttaa vasemmaksi muuten kuin peilaamisen avulla. Spatiotemporaalisen kätisyyden muuttuessa aika-avaruuden objektista tulee siis oma peilikuvansa.

<sup>22</sup> Huomaa, että spatiaalinen kätisyys ei muutu, ja täten spatiotemporaalisen kätisyyden muutos ei vaikuta esimerkiksi magneettikenttien suuntaan. (Ks. Esim. Malament 2004, 311–312 spatiotemporaalisesta pariteetin muunnoksesta ja magneettikentistä.)



vien 3.2 ja 3.4 maailmojen välillä – ainakaan ilman jotakin taianomaista rakettia, jolla voi matkustaa metafyyssisen tilan halki mahdollisesta maailmasta toiseen.”<sup>23</sup> Jotta siis voidaan saada tietoa teorian ajankäännös-invarianssista, niin havainnot on tehtävä joka tapauksessa tietystä ajan suunnasta käsin. Havaintoja tehtäessä voidaan muuttaa partikkelien paikkoja ja niiden nopeuksien suuntaa, mutta ajan suuntaa ei voida muuttaa. Standardimuunnos voidaan suorittaa kokeellisesti (ainakin periaatteessa, jos oletetaan, että aika-avaruus ei oleellisesti muutu prosessin ja sen ajankäännös-prosessin havaitsemisen välillä), mutta Malamentin muunnosta ei.

## 3.2 Ajan anisotropia

Nyt kun on esitetty tapa, jolla teorioiden ajankäännös-invarianssia voidaan tutkia, niin seuraava luonnollinen askel onkin kysyä, mitkä teoriat tai luonnonlait sitten ovat invariantteja ja mitkä epäinvariantteja. Lakien invarianssin selvittämisellä on tarkoitus saada tietoa ajan luonteesta. Joka-päiväinen kokemuksemme selkeästi viittaa siihen, että ajan kaksi suuntaa eroavat jollakin merkittäväällä tavalla toisistaan, ja tälle haluttaisiinkin löytää myös teoreettinen perusta. Tarkoituksena on siis löytää ajankäännös-epäinvariantti laki tai lakeja, jotka voisivat selittää, miksi tulevaisuus ja menneisyys vaikuttavat meistä niin erilaisilta. Tässä luvussa arvioin erilaisia prosesseja, jotka vaikuttavat toimivan eri tavalla menneisyyden ja tulevaisuuden suuntiin. Tällaiset prosessit osoittaisivat ajan olevan *anisotropinen*, eli sen kaksi suuntaa (menneisyyden ja tulevaisuuden suunnat) voitaisiin erottaa toisistaan.

### 3.2.1 Ajan anisotropian määritelmä

Esimerkiksi Reichenbach (1956, 26–27) ja Mehlberg (1961, 108–109) olettavat, että ajan suunta, tai ajan nuoli, määräytyy ajan anisotropiasta. Heidän ajatuksensa on, että jos aika on isotropinen, niin sen suunnat ovat samanlaiset, ja ajalla ei ole suuntaa. Kuitenkin anisotropia takaa vain sen, että ajan kaksi suuntaa eroavat toisistaan, eikä se valitse näistä kahdesta suunnasta toista tulevaisuuden suunnaksi (Grünbaum 1963, 210). Tarkempi muotoilu olisikin, että ajan on oltava anisotropinen, jotta olisi *mahdollista*, että sillä on suunta. Anisotropia itsessään ei takaa, että ajan suunta voitaisiin yksilöidä toiseksi kahdesta anisotropisesta suunnasta.

<sup>23</sup> Kirjoittajan oma suomennos. ”... in the actual world we can’t dial the time orientation. Nor can we check time reversal invariance by travelling between the worlds of Figure 2 and 3 – at least not without the help of a magical rocket ship that lets us traverse metaphysical space between different possible worlds.”

Mehlberg erottelee toisistaan tieteellisen ja esitieteellisen anisotropian. Esitieteellisellä anisotropialla hän tarkoittaa, että muistimme, havaintomme ja toimintamme tekevät selkeän eron ajan kahden suunnan välillä. Menneisyys muistetaan, mutta tulevaisuutta ei, ja toiminnalla pystytään vaikuttamaan tulevaisuuteen, mutta ei menneisyyteen. On kuitenkin loogisesti mahdollista, että tulevaisuus pystyttäisiin muistamaan, ja esitieteellinen anisotropia näyttääkin vaativan tieteellisen lain, joka sanoo, että tulevaisuuden muistaminen on mahdotonta. Tällöin esitieteellinen anisotropia riippuisi tieteellisestä anisotropiasta. Tieteellisellä anisotropialla Mehlberg tarkoittaa lakien ajankäännös-epäinvarianssia. Aika on hänen mukaansa tieteellisesti anisotropinen, jos on olemassa jokin laki, joka on ajankäännös-epäinvariantti – toisin sanoen jos on olemassa jokin prosessi  $P$ , jonka ajankäännös  ${}^R P$  on tämän luonnonlain vastainen. Mehlberg kuitenkin olettaa, että ajankäännös on sama asia kuin *ennen* ja *jälkeen* sanojen merkityksen vaihtaminen (*ennen-jälkeen-vaihdos*). Tulemme myöhemmin huomaamaan, että tämä oletus ei kuitenkaan välttämättä pidä paikkaansa. Tieteellisestä isotropiasta siis seuraa esitieteellinen isotropia, mutta tieteellisestä anisotropiasta ei välttämättä seuraa esitieteellistä isotropiaa, mikäli ne lait, jotka mahdollisesti osoittautuvat ajankäännös-epäinvariantteiksi, eivät ole relevantteja muistille ja toiminnan vaikutuksien anisotropialle. (Mehlberg, 1961, 106–109.) Minkä tahansa lain epäinvarianssi ei siis riitä selittämään psykologista ajan suuntaa, mutta tähän teemaan palataan myöhemmin.

Mehlberg vaatii siis, että jokin ajankäännös-prosessi  ${}^R P$  on *lakien vastainen*, jotta aika olisi anisotropinen. Grünbaum puolestaan on sitä mieltä, että ajan anisotropia edellyttää vain, että tällaista prosessia ei *de facto* tapahdu koskaan. Grünbaum sanoo, että prosessit voivat olla *käännettäviä* (reversible) tai *ei-käännettäviä* (irreversible) joko vahvassa tai heikossa mielessä. Vahva ei-käännettävyys tarkoittaa, että lait eivät salli käännettyä prosessia, ja heikko ei-käännettävyys tarkoittaa, että käännettyjä prosesseja ei *de facto* tapahdu maailmassa. Anisotropiaan riittää Grünbaumin mukaan jonkin prosessin heikko ei-käännettävyys, sillä myös tämä tuo esille *rakenteellisen eron* aika-akselin ennen ja jälkeen -suuntien välillä. (Grünbaum 1963, 209–211.) Grünbaum ei varsinaisesti tarkenna, mitä hän tällaisella rakenteellisella erolla tarkoittaa, mutta asiaa saattaa valottaa hänen käymänsä keskustelu Reichenbachin kanssa, joka myös käyttää rakenteellisen eron käsitettä.

Reichenbach käyttää ajan anisotropian havainnollistamiseksi analogiaa suoralla sijaitsevista pisteistä. Hänen mukaansa suoralla olevat pisteet voivat olla tietyssä järjestyksessä, mutta tällä järjestyksellä ei välttämättä ole suuntaa. Tällä suunnan puuttumisella hän tarkoittaa, että oikeaa ja vasenta

suuntaa ei pystytä *rakenteellisesti erottamaan* toisistaan, eli joudutaan osoittamaan jompaakumpaa suuntaa, jos se halutaan määritellä vasemmaksi (tai oikeaksi) suunnaksi. Jos kahden suunnan välillä ei ole rakenteellista eroa, niin vasenta voitaisiin kutsua oikeaksi ja oikeaa vasemmaksi, ja tätä merkitysten vaihtoa ei huomattaisi. (Reichenbach 1956, 26.) Rakenteellinen ero tarkoittaa Reichenbachille siis juuri sitä, että vasen-oikea-vaihdoksen vaikutus huomattaisiin. Kun edellä oleva muutetaan koskemaan aikaa, niin Reichenbach (1956, 26–27) päätyy tulokseen, että ajan suunta on seurausta siitä, että *ennen* ja *jälkeen* eroavat rakenteellisesti toisistaan. Esimerkiksi Mehlberg (1961, 110–111) kuitenkin tuo ilmi, että tällainen rakenteellinen ero (invarianssi ennen-jälkeen-vaihdoksessa) ei kuitenkaan kerro, kumpi ajan suunta on tulevaisuuden suunta. Rakenteellisesta erosta seuraa vain ajan anisotropia, ja kuten on jo huomattu, niin tämä ei yksilöi varsinaista ajan suuntaa (tulevaisuuden suuntaa).

Grünbaum ei kuitenkaan hyväksy Reichenbachin erottelua järjestyksen ja suunnan välillä. Grünbaumin mukaan järjestyksestä seuraa aina myös kahden suunnan eroavuus toisistaan riippumatta siitä, onko järjestys sisäinen vai ulkoinen. Reichenbach siis tekee väärin samaistaessaan suunnattoisuuden ja ulkoisen järjestyksen. (Grünbaum 1963, 215.) Ulkoisella järjestyksellä Grünbaum tarkoittaa sitä, että järjestys on konventionaalinen tai että järjestys vaatii viittauksen tiettyyn ulkoiseen havaitsijaan (Earman 1967, 547). Nyt Grünbaumin kanta voidaan tehdä selväksi: Tapahtumilla on aina suunta, jos ne ylipäättään ovat järjestyksessä. Tämä suunta on seurausta joko sisäisestä tai ulkoisesta järjestyksestä. Sisäinen järjestys tarkoittaa, että suunnilla on rakenteellinen ero keskenään (eli ajan tapauksessa suunnat ovat epäinvariantteja ennen-jälkeen-vaihdoksessa) ja ulkoinen järjestys, että järjestys on konventionaalinen tai riippuu havaitsijasta. Koska aika oli anisotropinen Grünbaumin mukaan silloin, kun suuntien välillä on rakenteellinen ero (eli epäinvarianssi ennen-jälkeen-vaihdoksessa), niin ajan anisotropiaan tarvitaan ajan sisäinen järjestys. Ajalla taas on tällainen sisäinen järjestys silloin, kun jokin prosessi, joka tapahtuu ajassa toiseen suuntaan, ei de facto koskaan tapahdu toiseen suuntaan. Anisotropia tarkoittaa Grünbaumille tarkalleen ottaen *sisäistä* anisotropiaa. Ulkoisen konventionkin avulla voidaan tuottaa ajan anisotropia eli ajan suuntien välinen ero, mutta tämä ei tarkoita, että ajalla todella olisi ominaisuus olla anisotropinen.

Kerrataan vielä näiden herrojen versiot anisotropiasta: Mehlbergin mukaan ajan tieteellinen anisotropia seuraa lakien (tai ainakin yhden lain) nomologisesta ajankäännös-epäinvarianssista. Lisäksi hän samaistaa ajankäännös-epäinvarianssin ja ennen-jälkeen-vaihdoksen epäinvarianssin. Reichen-

bachille ajan anisotropia tarkoittaa rakenteellista eroa *ennen* ja *jälkeen* välillä, mikä taas saadaan selville ennen-jälkeen-vaihdoksen avulla. Grünbaum taas esittää, että prosessien de facto ei-käännettävyys (ajankäännös-epäinvarianssi) riittää anisotropian synnyttämiseen, mutta painottaa, että tästä ei seuraa tulevaisuuden suuntaa (tai ajan nuolta), vaan vain kahden suunnan erottelu toisistaan.

### 3.2.2 Anisotropian määritelmien kritiikki

Earman kritisoi erityisesti Grünbaumin anisotropian versiota. Mitä Grünbaumin mallissa ajan anisotropialle sitten tapahtuu, jos kaikki prosessit ovat käännettäviä? Grünbaum oli sitä mieltä, että tällöin on sanottava, että aikajärjestys ja ajan suunta ovat ulkoisia. Tämä ulkoisuus tarkoittaa, että se, onko tapahtuma E toista tapahtumaa E' ennen vai jälkeen, on joko konventionaalinen tai sitten havaitsijasta (viitekehyksestä) riippuva. Oletetaan, että E ja E' eivät ole kausaalisesti yhdistettävissä. Tällöin eri viitekehyksistä ollaan eri mieltä niiden aikajärjestyksestä, vaikka aika olisi anisotropinen. Jos taas oletetaan, että E ja E' ovat kausaalisesti yhdistettävissä<sup>24</sup>, niin silloin kaikista viitekehyksistä katsottuna niiden aikajärjestys on sama. Anisotropian nähdään siis koskevan vain tapahtumia, jotka ovat kausaalisesti yhdistettävissä ja tällaisten tapahtumien aikajärjestys ei riipu viitekehyksestä. Tästä seuraa, että jos kaikki prosessit ovat käännettäviä, niin tapahtumien aikajärjestyksen on oltava Grünbaumille konventionaalinen. Nyt Earman esittää, että sanoakseen aikajärjestyksen olevan konventionaalinen silloin, kun kaikki havaitsijat ovat yhtä mieltä aikajärjestyksestä, täytyy Grünbaumin olettaa, että kenellekään havaitsijalle ei voi olla totta eikä epätotta, että E on ennen E':a. Earmanin mukaan Grünbaum ei näytä tukevan tällaista johtopäätöstä, minkä lisäksi se on hänen mielestään epäkoherentti, sillä käännettävyyden käsite vaatii ajan suuntien erottelun. (Earman 1967, 544 ja 548.)

Grünbaum kuitenkin oletti, että myös de facto ei-käännettävät prosessit kelpaavat muodostamaan rakenteellisen eron *ennen* ja *jälkeen* välille. Täten edellä esitetty kritiikki pätee vain, jos maailmassa ei ole yhtään de facto ei-käännettävää prosessia. Tämä on samaan aikaan Grünbaumin version vahvuus ja heikkous, sillä jos hän olettaisi vain nomologisen ei-käännettävyyden kelpaavan, niin (koska lait todella vaikuttavat pitkälti käännettäviltä) hän joutuisi edellisen kritiikin kohteeksi herkemmin. Toisaalta de facto ei-käännettävyyden hyväksyminen aiheuttaa monia muita ongelmia.

<sup>24</sup> Kausaalista yhdistettävyyttä käsitellään enemmän kausaalista ajanteoriaa koskevassa luvussa.

Ensinnäkin voidaan kysyä, että jos ajan anisotropia seuraa jostakin de facto ajallisesta asymmetriasta (prosessin ei-käännettävyydestä), niin miksi kaikki ajalliset asymmetriat eivät tuota anisotropiaa. Miksi esimerkiksi se, että jokin prosessi havaitaan useammin kuin sen käännetty prosessi, ei tuota ajan anisotropiaa? Jos samaa ajatusta sovelletaan ajan suunnan sijasta avaruuden suuntaan, niin voitaisiin kysyä, miksi se, että suurin osa ihmisistä on oikeakätisiä, ei kerro avaruuden anisotropiasta mitään. (Earman 1969, 277 ja 285–286.) Tämä kritiikki kohdistuu siihen, että hyväksyessään de facto ei-käännettävyyden Grünbaum asettaa itsensä niin kutsutulle *kaltevalle pinnalle* (slippery slope), joka helposti johtaa myös muiden de facto asymmetrioiden hyväksymiseen. Lisäksi vaikuttaa siltä, että Grünbaum ei voi vedota de facto asymmetrian liittyvän mihinkään nomologiseen (lainomaiseen) asymmetriaan, koska hän juuri tekee näiden välille selkeän eron puhuessaan vahvasta ja heikosta ei-käännettävyydestä.

Toiseksi de facto ei-käännettävyyden hyväksymisestä seuraa, että jokainen luonnonlakien mukainen universumin malli on triviaalisti ajallisesti anisotropinen. Nimittäin jokaista tällaista mallia vastaa jokin prosessi, joka sisältää tämän mallin koko historian. Tätä koko historiaa (eräänlainen superprosessi, joka sisältää kaikki aliprosessit) taas ei voi tapahtua käännetysti itsensä sisällä. (Earman 1974, 32.) Voidaan tietenkin kuvitella, että tällä superprosessilla olisi jokin keskikohta, jonka suhteen se olisi symmetrinen, ja tällöin prosessi sisältäisi myös käännetyn itsensä (koska ne olisivat sama prosessi). Tällöin olisi mahdollista kuvailla tapahtumia siten, että ajan suunta on kääntynyt prosessin keskikohdassa, ja prosessi ei siis sisältäisi itsensä ajallista käännöstä. Tässä tapauksessa kuitenkin prosessin ajallinen käännös tapahtuisi toiseen suuntaan ajassa, jolloin universumin malli olisi ajankäännöksen Malamentin muunnoksen mukaan käännettävä (eli isotropinen), mutta standardimuunnoksen mukaan ei (eli anisotropinen). Joka tapauksessa Grünbaumin de facto oletuksesta näyttää seuraavan hankalia ja mielenkiintoisia ongelmia.

Edellä esitetyistä ajan anisotropian määritelmistä huomataan, että ainakin Mehlberg ja Reichenbach (ja myös Grünbaum, jos hän tarkoittaa rakenteellisella erolla samaa kuin Reichenbach) ymmärtävät ajankäännöksellä samaa kuin ennen-jälkeen-vaihdoksella. Earman kuitenkin esittää, että näiden välillä on selkeä ero, jolla on merkittävä vaikutus anisotropialle. Hänen mukaansa ajankäännös-invarianssi ei ole sama asia kuin ennen-jälkeen-vaihdos-invarianssi. Lait voivat olla ajankäännös-

invariantteja, mutta silti ne voivat olla hyvin epäinvariantteja ennen-jälkeen-vaihdoksessa. Earmanin esimerkkinä toimii pallo, joka pyörii pisteestä P pisteeseen Q. Nyt jos asetamme esteen pisteeseen R (joka on P:n ja Q:n välissä) *ennen* kuin pallo saavuttaa tämän pisteen, niin pallo pomppaa takaisin P:hen. Jos asetamme esteen R:ään sen *jälkeen*, kun pallo on ohittanut tämän pisteen, niin pallo jatkaa matkaansa Q:hun. Tämä prosessi on kummassakin tapauksessa täysin ajankäännös-invariantti<sup>25</sup>, mutta kummassakaan tapauksessa se ei ole Earmanin mukaan ennen-jälkeen-vaihdos-invariantti. (Earman, 1967, 546.) Jos siis palloesimerkin ensimmäisessä tapauksessa suoritamme ennen-jälkeen-vaihdoksen, niin saamme lauseen: ”Jos asetamme esteen pisteeseen R sen jälkeen, kun pallo on saavuttanut tämän pisteen, niin pallo pomppaa takaisin P:hen<sup>26</sup>. Tämä lause ei ole järkevä tai luonnonlakien mukainen, joten prosessi ei ole ennen-jälkeen-vaihdos-invariantti.

Earmanin mukaan ennen-jälkeen-epäinvarianssi riittää ajan anisotropian olemassaoloon, joten ajankäännös-epäinvarianssi ei ole *välttämätön ehto* ajan anisotropialle. Ero näiden kahden aikasymmetrian määrittelyn välillä seuraa Earmanin mukaan siitä, että ajankäännös-invarianssi takaa ennen-jälkeen-invarianssin vain tietyille ryhmälle lauseita. Nämä kaikki lauseet ovat muotoa ”Jos prosessi on alkutilassa  $S_I$ , niin se on tietyn intervallin  $t$  päästä tilassa  $S_F$ .” Tällaiset lauseet ovat kuitenkin vain yksi pieni osajoukko lauseista, jotka ovat loogisia seurauksia tietystä laista. Lisäksi Earman uskoo, että jokapäiväiset asymmetriat ajassa voidaan selittää ennen-jälkeen-vaihdoksen epäinvarianssin avulla. (Earman 1969, 282–283.) Earmanin käsitys ennen-jälkeen-vaihdoksesta on, että se sisältää enemmän kuin pelkkä ajankäännös. Se siis koskee suurempaa joukkoa seurauksia kuin ajankäännös. Jos jokin laki on ajankäännös-epäinvariantti, niin se takaa, että laki on myös epäinvariantti ennen-jälkeen-vaihdoksessa, mutta ei toisinpäin. Täten siis ajankäännös-epäinvarianssista seuraa ajan anisotropia, mutta ajankäännös-invarianssista ei seuraa ajan isotropiaa. (Earman 1969, 208–281.)

Mielestäni kuitenkin ennen-jälkeen-vaihdoksen prosessi olisi tarpeen määritellä selkeämmin. Earmanin esittämässä palloesimerkissä voidaan mielestäni ajatella, että ”asettaminen” sisältää implisiit-

<sup>25</sup> Tämä johtuu siis siitä, että klassinen mekaniikka on ajankäännös-invariantti teoria. Tätäkin invarianttisuutta voidaan selventää kuvittelemalla, että pallon vieriminen kuvataan nauhalle, ja näytetään takaperin. Kummassakin tapauksessa myös takaperin näytetty prosessi on täysin luonnonlakien mukainen.

<sup>26</sup> Huomaa, että tässä on muutettava myös ”saavuttaa” muotoon ”on saavuttanut”, koska nämä sanat implisiittisesti sisältävät viittauksen ”ennen” tai ”jälkeen” sanoihin. Ennen-jälkeen-vaihdoksessa siis niiden konseptit vaihtuvat, eivätkä pelkät sanat.

tisesti viittauksen *ennen* ja *jälkeen* sanoihin. Esteen asettamisella tarkoitetaan, että este on *ensin* jonkin henkilön kädessä (tai jonkin koneen hallittavissa), ja sen *jälkeen* se on pinnalla, jossa pallo pyörii. *Asettaminen* nimenomaan tarkoittaa, että ”*ennen* asettamista este ei ole paikallaan, mutta asettamisen *jälkeen* este on paikallaan.” Jos tähän asettamisen määritelmään tehdään ennen-jälkeen-vaihdos, niin saadaan seuraava määritelmä ”--- tarkoittaa, että *jälkeen* --- este ei ole paikallaan, mutta --- *ennen* este on paikallaan.” Nyt ”asettaminen” ei sovi ---:n paikalle, mutta ”poistaminen” sopii. Täten palloesimerkin ennen-jälkeen-käännöksen pitäisikin kuulua: ”Jos poistamme esteen pisteestä R sen jälkeen, kun pallo on saavuttanut tämän pisteen, niin pallo pomppaa takaisin P:hen”. Tämä uusi ennen-jälkeen-käännös taas on täysin lakien mukainen, eikä ollenkaan mieletön. Mielestäni ennen-jälkeen-vaihdosta tulisikin valottaa enemmän, jotta varmistutaan, että anisotropiassa ei ole kysymys vain tällaisista piilomerkityksistä.<sup>27</sup>

### 3.2.3 Mahdollisia anisotropisia prosesseja

Millaiset prosessit sitten ovat ajankäännös-epäinvariantteja ja täten voisivat muodostaa ajan anisotropian? Tässä kohtaa ymmärrän anisotropialla Mehlbergin, Grünbaumin ja Reichenbachin määrittelemää anisotropiaa, eli juuri ajankäännös-epäinvarianssia. Earman (1969, 282) sanoo, että useat ajankäännös-invariantit lait ovat jossain mielessä ennen-jälkeen-vaihdos-epäinvariantteja, ja tästä syystä hänen määritelmänsä anisotropiasta ei ole kovinkaan kiinnostava.

Reichenbach (1956, 30–31) esittää, että klassisessa fysiikassa vain termodynaamiset prosessit ovat ei-käännettäviä. Termodynaamisissa prosesseissa tietyn systeemin entropia (eli epäjärjestys) kasvaa ajan kuluessa. Tällaisia ei-käännettäviä prosesseja ovat esimerkiksi kaasujen tai nesteiden sekoittuminen toisiinsa (vaikkapa maidon sekoittuminen kahviin) tai lämmön siirtyminen kuumasta kappaleesta kylmempään. Emme koskaan havaitse prosessia, jossa maitokahvista erottuisi maito ja kahvi toisistaan tai jossakin huoneessa olevat happimolekyylit itsestään siirtyisivät huoneen yhteen kulmaan ja jättäisivät huoneen ihmiset hengittämään pelkkää typpeä. Itse asiassa termodynaamiset prosessit ovat hyvinkin käännettäviä – ainakin nomologisesti –, vaikka niitä ei aktuaalisesti tunnukaan esiintyvän. Reichenbachin esittämät termodynaamiset prosessit muodostaisivat siis ajan anisotropian Grünbaumin mukaisessa de facto mielessä, mutta eivät Mehlbergin vaatimassa nomologi-

<sup>27</sup> Ks. Esim. Bergerin (1971) ja Weingardin (1972) keskustelu ennen-jälkeen-vaihdoksen ja ajankäännöksen identtisyydestä. Berger on sitä mieltä, että nämä ovat identtiset keskenään, ja Weingard argumentoi, että Berger tekee virheen määritellessään ennen-jälkeen-vaihdosta, mistä johtuu hänen virheellinen käsityksensä näiden identtisyydestä.

sessä mielessä. Tähän aiheeseen palataan syvemmin myöhemmissä luvuissa, joissa tehdään syväluotaava analyysi termodynaamisten prosessien käännettävyyteen ja ajan suuntaan.

Kuitenkin esimerkiksi Karl Popper on esittänyt, että on olemassa ei-käännettäviä prosesseja, joiden ei-käännettävyys on itsenäistä entropian kasvusta ja termodynamiikasta. Tällaisia prosesseja on Popperin mukaan erityisesti aaltoliikkeeseen liittyvät prosessit, joissa yhdestä pisteestä leviää kehämäinen aaltoliike. (Ks. Esim. Popper 1956a, Popper 1956b, Popper 1957 ja Popper 1958.) Popperin oma esimerkki koskee veden pintaa, johon tiputetaan kivi, joka synnyttää mainitun kehämäisen aaltoliikkeen. Tämä aaltoliike alkaa voimakkaana (isot aallot) ja hiipuu pikkuhiljaa pienempien aaltojen kautta olemattomaksi. Tällaisen prosessin ajankäännös-prosessi olisi siis sellainen, että veden pinnalla alkaa syntyä kehältään hyvin suuria heikkoja aaltoja, jotka kulkiessaan kehän keskipeistettä kohti voimistuvat ja lopulta kohtaavat keskipisteessä yhtenä suurena loiskauksena. (Popper 1956b, 538.)

Toisena – hieman modernimpana – esimerkkinä voidaan mainita valon eteneminen pistemäisestä valonlähteestä. Tässä valo etenee tietystä keskipisteestä kehämäisenä säteilynä joka suuntaan. Käännetty prosessi olisi tietysti sellainen, jossa valoa tulisi jostakin kaukaisuudesta joka suunnasta, ja nämä valonsäteet kaikki kohtaisivat tiettyssä pisteessä. Tämä olisi hyvin epätodennäköinen – ellei jopa mahdoton – skenaario. Popper kuitenkin ymmärtää, että molempien esimerkkien käännetty prosessit ovat itse asiassa luonnonlakien mukaisia, mutta ne vaativat tiettyjä alkuehtoja, jotka eivät – ainakaan spontaanisti – konkreettisesti toteudu. Tällainen aaltojen yhtäaikainen saapuminen tiettyyn pisteeseen ei tapahdu sattumalta, vaan vaatii monta yhtenevää syytä, jotka näyttävät toimivan yhteistä päämäärää varten. (Popper 1957, 1297.) Grünbaum huomauttaa, että Popperin ei tarvitse olettaa alkuehtojen spontaanitutta, jos kyseessä on ääretön avaruus. Tässä tapauksessa ei ole mitenkään mahdollista tuottaa tilannetta, jossa äärettömyyksistä tulee ääretön määrä säteitä, jotka kohtavat tiettyssä pisteessä. Tällaista ei siis tapahdu spontaanisti eikä tuottamuksellisesti, vaan se vaatisi selitykseen Grünbaumin mukaan *deus ex machina*:n. Grünbaum esittää, että spontaanisuus-ehto tarvitaan kuitenkin, jos kyseessä on äärellinen avaruus. Tässä tapauksessa voidaan avaruuden ”reu-



noilta” lähettää säteet siten, että ne kaikki kohtaavat jossakin pisteessä.<sup>28</sup> (Grünbaum 1963, 267–271.)

Popper kuitenkin myöntää, että myös tällaisiin prosesseihin sisältyy entropian kasvua. Niiden ei-käännettävyys on kuitenkin itsenäistä entropiasta, koska tällaisen prosessin käännetty versio on sellainen, että sen syntymisen ehtoja ei voida täyttää riippumatta siitä, miten entropia käyttäytyy tässä käännettyssä prosessissa. Michael Esfeld (2006, 4) toteaa, että Popperilla voidaan nähdä olevan kolme pääteesiä: 1) Säteilyyn liittyvät prosessit ovat ei-käännettäviä ja ne ovat olennaisia kosmisella asteikolla. 2) Säteilyyn liittyvät ei-käännettävät prosessit ovat itsenäisiä termodynaamisista ei-käännettävistä prosesseista. 3) Termodynaamiset ei-käännettävät prosessit eivät ole olennaisia kosmisella asteikolla mitattuna. Ensimmäinen teesi on pitkälti yleisesti hyväksytty – ainakin de facto ei-käännettävyyden osalta (Esfeld 2006, 4). Toinen ja kolmas teesi juontavat juurensa siihen, että entropiaa ei voida Popperin mukaan määritellä äärettömälle avaruudelle ja siihen, että mikä tahansa statistinen (eli vain todennäköisyyksiin perustuva) ajan suunnan teoria – jollainen termodynaamisen ajan suunnan teorian huomataan myöhemmin olevan – ei ole Popperin mukaan hyväksyttävä (Esfeld 2006, 6 ja Grünbaum 1963, 267–268).

Statistisen termodynamiikan käsittely tapahtuu tarkemmin myöhemmässä tekstissä, mutta huomautettakoon jo tässä, että esimerkiksi Grünbaum on sitä mieltä, että vaikka säteilyyn liittyvät ei-käännettävät prosessit tuottavat ajan anisotropian, niin niiden avulla ei voida määritellä ajan suuntaa. Ajan suunnan määrittämiseksi tarvitsemme kuitenkin termodynaamisia prosesseja ja entropian kasvua, sillä säteilyyn liittyvät prosessit eivät kerro, kumpi kahdesta prosessin hetkestä on toista myöhempi ja kumpi toista aikaisempi. Termodynaamisissa prosesseissa voimme määritellä myöhemmäksi sen hetken, jonka entropia on korkeampi, mutta säteilyn kohdalla tällainen vastaava määrittely ei ole mahdollista. (Grünbaum 1963, 277–278.) Lisäksi on huomattava, että säteilyprosessien tuottama ajan suunta on yhtä paljon vain statistinen (todennäköinen) kuin termodynaamistenkin prosessien. Säteilyprosessien ei-käännettävyys perustuu vain siihen, että on erittäin epätodennäköistä, että universumi olisi järjestynyt siten, että se tuottaisi ”romahtavia” säteilykehiä (Sklar 1993,

<sup>28</sup> Tässä tapauksessa valonsäteiden ”räjähdys” (explosion) on paljon todennäköisempi kuin niiden ”romahdus” (implosion), koska valoa tuottavia pisteitä on huomattavasti enemmän kuin valoa tuottavia täydellisiä ympyröitä. Kuitenkin, jos ”valonsäteitä” ajatellaan fotoneina, niin meidän ei tarvitse olettaa, että valonsäteet tulisivat jostakin täydellisestä ympyrästä avaruuden ”ulkokehältä”, vaan ne voidaan lähettää pistemäisistä valonlähteistä, joita vain sattuu olemaan hyvin paljon (ellei äärettömästi). (Mehlberg 1961, 123.)

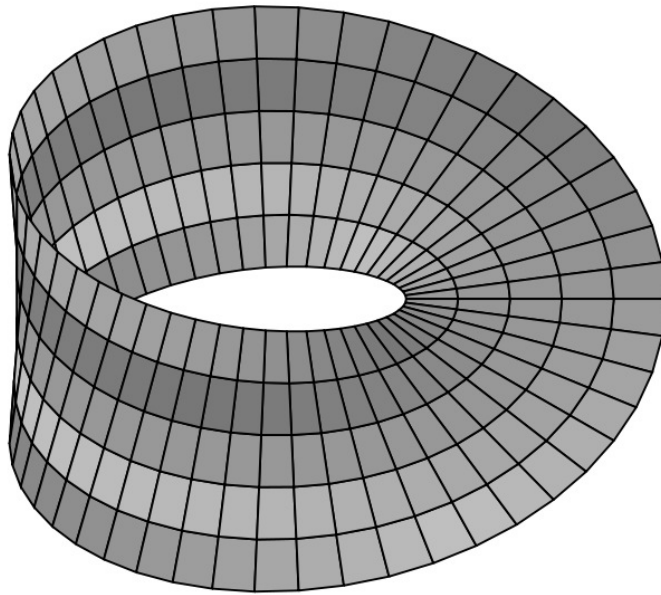
305). Toisin sanoen pistemäisten säteilyä tuottavien objektien olisi pitänyt järjestyä täydellisiin ympyröihin, jotta niiden lähettämä säteily (valon tapauksessa fotonit) voisi kohdata yhtäaikaaisesti ympyrän keskipisteessä. Tällainen alkutilan järjestys on täysin luonnonlakien mukaista, vaikka se onkin hyvin epätodennäköistä. Myös siis säteilyprosessien tuottama ajan suunta on vain statistinen, ja sellaisena riippuu universumin alkutilaa koskevasta oletuksesta – aivan samaan tapaan kuin menneisyshypoteesia käsittelevässä luvussa huomataan termodynaamisen ajan suunnan riippuvan. Täten myöskään säteilyprosessien tuottama ajan suunta ei voisi Popperille olla hyväksyttävä, vaikka hän sitä puolustaakin.

Niin termodynamiikka kuin säteilykin siis tuottavat vain statistisesti tulkittuna suunnan ajalle. Nämä prosessit eivät siis ole ajankäännös-epäinvariantteja Mehlbergin tarkoittamassa nomologisessa mielessä. Itse asiassa Mehlberg esittää, että mikään prosessi ei synnytä ajan suuntaa. Täten ajatuksesta, että ajalla olisi suunta, on luovuttava. Hän toteaa, että niin klassinen mekaniikka, sähkömagnetismi kuin termodynamiikkakin ovat ajankäännös-invariantteja, eivätkä täten voi olla ajan suunnan perustana. (Mehlberg 1961, 112–118.) Tämä väite voidaan hyväksyä edellä käsitellyn perusteella, jos vain hyväksymme Mehlbergin ajatuksen, että ajan anisotropiaan ja suuntaan tarvitaan nomologisesti ajankäännös-epäinvariantteja lakeja tai prosesseja.

Mielenkiintoinen huomio Mehlbergin käsittelyssä on myös se, että hän ei suoralta kädeltä tyrmää kvanttimekaniikan mahdollista ajankäännös-epäinvarianssia. Oikeastaan hänen mukaansa jotkin kvanttimekaniikan prosessit saattavat olla ei-käännettäviä, mutta nämä prosessit eivät silti tuota ajan suuntaa. Hänen argumenttinsa on se, että nämä prosessit ovat kosmologisella skaalalla niin pieniä, mitättömiä ja harvassa, että ne eivät voi selittää koko universumin kattavaa ajan suuntaa. (Mehlberg 1961, 118–120.) Tällaisten paikallisten mikroprosessien ei-käännettävyys ei myöskään selitä makroprosessien (kuten omien havaintojemme) ajallista epäsymmetriaa. Havaitsemme ajan suunnan niin kattavasti ja välittömästi, että kyseiset mikroprosessit eivät tarjoa perustaa näille psykologisille havainnoille. Tärkein motiivi ajankäännös-epäinvarianttien prosessien löytämiselle onkin se, että havaitsemme ja koemme ajan olevan selkeästi anisotropinen, ja haluamme löytää tälle jonkin selityksen maailmasta itsestään. Myöhemmissä luvuissa käsitellään vielä yksityiskohtaisesti termodynamiikkaa ajan anisotropian ja suunnan kannalta, ja erityisesti palataan myös käsittelemään ihmisten kokemaa ajan suuntaa ja tämän psykologisen suunnan selitettävyyttä termodynaamisten teorioiden kautta.

### 3.3 Ajan suunnistuvuus

*Suunnistuvuudella* (orientability) tarkoitetaan matematiikassa tason mahdollista ominaisuutta, jonka mukaan tasolle voidaan määrittää johdonmukaisesti normaali<sup>29</sup> joka pisteessä. Toisin sanoen, jos tasosta nousee kohtisuorasti vektori, ja tätä vektoria liikutetaan tasolla jatkuvasti (ei siis reunojen yli), niin vektoria ei voida tuoda samaan tason pisteeseen siten, että se osoittaisi toiseen suuntaan kuin aluksi. Vielä yksinkertaistetummin voitaisiin sanoa, että taso on suunnistuva, jos sille voidaan määrittää johdonmukaisesti yläpuoli ja alapuoli (tai jos kyseessä on pallon pinta tai nauhamainen taso, josta on tehty lenkki, niin tälle tasolle pitäisi voida määrittää sisäpuoli ja ulkopuoli). Nyt siis esimerkiksi pallon pinta, toruksen pinta, lenkkimäisen nauhan pinta tai normaali tasainen taso ovat suunnistuvia. Toisaalta taas esimerkiksi Möbiuksen nauha (ks. kuva 3.6) ei ole suunnistuva, sillä siinä normaalivektoria voidaan kuljettaa tasolla, ja päätyä takaisin alkupisteeseen siten, että vektori osoittaa toiseen suuntaan kuin aluksi. Toisin sanoen Möbiuksen nauhalla ei ole sisä- tai ulkopuolta, vaan sillä on vain yksi puoli.



Kuva 3.6 (Möbiuksen nauha)

<sup>29</sup> Tason normaali on sen kanssa kohtisuorassa oleva vektori.

Myös aika-avaruuden voidaan sanoa olevan *ajallisesti suunnistuva*. Earmanin (1972, 76) määritelmän mukaan aika-avaruus  $M$  on ajallisesti suunnistuva, jos ja vain jos  $M$ :ssä on kaikkialla määritelly jatkuva ajankaltainen vektorikenttä. Ajankaltaisella vektorilla tarkoitetaan vektoria, jonka alkupiste ja loppupiste ovat keskenään ajankaltaisia eli kausaalisesti yhdistettävissä. Tietystä aika-avaruuden pisteestä (tapahtuma) piirretty ajankaltainen vektori on siis tästä tapahtumasta lähtevän valokartion sisällä. Ajankaltainen vektorikenttä taas tarkoittaa, että jokaisessa aika-avaruuden pisteessä on ajankaltainen vektori ja että nämä vektorit yhdessä muodostavat koko aika-avaruuden kattavan kentän.

Mitä sitten tarkoittaa, että aika-avaruus  $M$  on tällä tavalla ajallisesti suunnistuva? Earman esittää, että tällöin voidaan valita mikä tahansa  $M$ :n piste  $x$ , ja nimittää toinen puolisko sen valokartiosta ”tulevaisuuden puoliskoksi” ja toinen puolisko ”menneisyyden puoliskoksi”. Nyt jos pisteestä  $x$  lähtevä, tulevaisuuden suuntaan osoittava ajankaltainen vektori siirretään toiseen pisteeseen  $y$  siten, että tämä siirto on jatkuva ja pitää ajankaltaiset vektorit ajankaltaisina, niin sen valokartion puoliskon, johon vektori osoittaa  $y$ :ssä, voidaan myös sanoa olevan tulevaisuuden suuntainen. Ajallinen suunnistuvuus takaa tässä sen, että mistään pisteestä vektoria ei voida siirtää pois ja tuoda siihen takaisin (pitäen se aina ajankaltaisena) siten, että tämä vektori osoittaisi toiseen valokartion puoliskoon kuin lähtötilanteessa. (Earman 1974, 17.) Toisin sanoen, jos aika-avaruus on ajallisesti suunnistuva, niin ajalla voidaan sanoa olevan tietty yksikäsitteinen suunta kussakin aika-avaruuden pisteessä, ja tämä suunta pysyy samana kaikissa pisteissä.

Nyt Earman (1974, 18) kysyykin (antamatta siihen vastausta tai edes omaa mielipidettään), että voidaanko kaikki ajallisesti ei-suunnistuvat aika-avaruudet sulkea pois a priori mahdottomina viitekehyksinä fysiikalle. Earman kuitenkin tuntuu koko ajan olettavan, että ainakin aktuaalinen aika-avaruus olisi ajallisesti suunnistuva, ja vaikuttaa haasteelliselta kuvitella, millaisia kokemuksia ajallisesti ei-suunnistuva aika-avaruus synnyttäisi.

Ajan suunnistuvuus siis takaa, että ajalla on kaksi erillistä suuntaa kaikissa aika-avaruuden pisteissä ja että nämä suunnat eivät vaihdu toisikseen pisteestä toiseen siirryttäessä. Suunnistuvuus ei kuitenkaan yksilöi *tulevaisuuden suuntaa* näistä kahdesta mahdollisesta suunnasta. Pisteestä  $x$  lähtevät valokartion puoliskot ovat siis keskenään yhdenveroiset, ja tulevaisuuden puolisko täytyy selvittää

jollakin muulla tavalla kuin suunnistuvuuden avulla. Se kumpi valokartion puolisko nimetään tulevaisuuden puoliskoksi vastaa nyt tulevaisuuden suunnan määrittämistä (Earman 1974, 18). Tässä tulee siis erotella toisistaan ajan suunta sinänsä, ja ajan suunta siinä mielessä, että se tarkoittaa tulevaisuuden suuntaa. Tässä työssä ajan suunnalla tarkoitetaan yleisesti ottaen jälkimmäistä. Ajan suunta sinänsä on kuitenkin käyttökelpoinen käsite, sillä se tuo esille yhden ajan ominaisuuden, jota pelkästään tapahtumien ennen/jälkeen relaatiot eivät voi määrittää. Esimerkiksi kehämaisessa aikavaruudessa (suljetussa ajassa) ei voida sanoa, kumpi tapahtuma tapahtuu *ennen* toista tapahtumaa, mutta voidaan silti sanoa, että ajalla on tietty *suunta*, johon se kulkee. Jos siis ajan ajatellaan olevan vaikkapa topologisesti ympyrän mallinen, niin tällöin ei voida sanoa, kumpi tapahtuma tapahtuu toista ennen, mutta ympyrästä voidaan silti erottaa myötäpäivään kulkeva ja vastapäivään kulkeva suunta. Ajan suunnistuvuus sanoo, että nämä ovat erilliset suunnat, ja jos voidaan selvittää (tai tehdä määritelmä tai konventio), kumpi valokartion puoliskoista on tulevaisuuden puolisko, niin voidaan sanoa kulkeeko aika myötäpäivään vai vastapäivään tässä ympyrässä.

Valokartion tulevaisuuden puoliskon määrittäminen on ajateltu mahdolliseksi juuri edellä käsiteltyjen ajallisesti ei-käännettävien prosessien avulla. Esimerkiksi termodynaamiset teoriat sanoisivat, että  $x:n$  valokartion tulevaisuuden puolisko olisi se, jossa entropia on korkeampi kuin  $x:ssä$ . Ennen kuin siirrytään käsittelemään termodynaamisia teorioita ajan suunnasta, niin tehdään kuitenkin katsoaus seuraavassa luvussa kausaaliin ajanteorioihin. Näiden tavoitteena on selvittää aiemmin esillä ollutta tapahtumien aikajärjestystä, eikä niinkään ajan suuntaa.

## 4 KAUSAALINEN AJANTEORIA

Kausaalisilla ajanteorioilla on yritetty vastata erityisesti edellä esillä olleeseen ongelmaan tapahtumien aikajärjestyksestä. Nykyiset entropian kasvuun perustuvat (eli termodynaamiset) teorit ajan suunnasta perustuvat pitkälti kausaalisten teorioiden pohjalle, sillä niissä termodynaamiset prosessit nähdään ei-käännettävinä kausaalisina prosesseina. Kausaalinen teoria vaikuttaa suhteellisuusteorian puitteissa mielekkäimmältä tavalta lähestyä aikajärjestykseen liittyvää ongelmaa. Kausaaliset ajanteoriat pyrkivät määrittelemään ajallisia käsitteitä uudelleen, ja tällä tavalla sovittaa suhteellisuusteorian tulokset aikajärjestyksen teoriaan.

### 4.1 Kausaalisen ajanteorian versioita

Kausaalisten ajanteorioiden pääajatus on niissä kaikissa sama: tapahtumien kausaaliset suhteet kertovat niiden ajallisen järjestyksen. Yleisesti ottaen niissä määritellään samanaikaisiksi tapahtumat, jotka eivät voi olla kausaalisuhteessa keskenään, ja tämän lisäksi määritellään joko ajallinen ennen/jälkeen relaatio tai ajallinen välissä relaatio kausaalisuhteiden avulla. Eri versioiden välillä voidaan kuitenkin nähdä huomattavia eroja, ja seuraavaksi käsitelläänkin neljä toisistaan poikkeavaa kausaalista ajan suunnan teoriaa. Näistä kaksi on esittänyt kausaalisen ajan teorian isä Hans Reichenbach, ja toiset kaksi Adolf Grünbaum ja Bas Van Fraassen.

#### 4.1.1 Reichenbachin varhainen teoria

Aiemmin huomattiin, että aikajärjestyksestä ei voida perustaa subjektiiviseen kokemukseen, vaan tulisi löytää parempi kriteeri, joka määrittäisi tapahtumien aikajärjestyksen. Reichenbach (1958, 136) esittää, että tällainen kriteeri voidaan löytää *kausaalirelaatiosta*. Hän tuntuu ottavan kausaalirelaation määritelmän primitiivisenä, sillä sitä, mitä tarkoittaa, että kaksi tapahtumaa on kausaalirelaatiossa keskenään, ei Reichenbach erityisesti määrittele. Kuitenkin esimerkiksi *genidenttiset* (genidentti-ty)<sup>30</sup> tapahtumat ovat selkeästi kausaalisia Reichenbachin kielenkäytössä. Esimerkiksi Malament (1977, 294) määrittelee, että kaksi tapahtumaa on *kausaalisesti yhdistettävissä*, jos ja vain jos on mahdollista, että foton – tai jokin partikkeli, jonka massa on suurempi kuin 0 – voi matkustaa toisesta tapahtumasta toiseen (jompaankumpaan suuntaan). Tällaiseksi kausaalirelaatio tulee yleisesti ottaen kausaalisissa ajanteorioissa ymmärtää.

---

<sup>30</sup> Reichenbach (1958, 270) määrittelee tapahtumat genidenttisiksi, jos ne kuuluvat samalle maailmanlinjalle, eli jos sama kappale tai olio kokee suoraan nämä kaksi tapahtumaa.

Olkoon nyt  $E_1$  ja  $E_2$  toisiinsa nähden kausaalisessa relaatiossa.<sup>31</sup> Reichenbach (1958, 136) määrittelee, että jos  $E_2$  on  $E_1$ :n *seurausta*, niin silloin  $E_2$  tapahtuu *myöhemmin kuin*  $E_1$ . Samalla tulee tietysti määritellyksi myös aikaisempi kuin relaatio, sillä se on vain edellisen käännös, joka seuraa siitä analyyttisesti (Reichenbach 1958, 136).

Nyt täytyy kuitenkin kysyä, voidaanko todella tietää, kumpi tapahtuma on kumman seurausta ilman, että jo valmiiksi tiedetään aikajärjestys näiden tapahtumien välillä. Toisin sanoen on osoitettava, että tämä määritelmä ei ole kehällinen. Normaalisti sanottaisiinkin, että kahdesta kausaalirelaatiossa olevasta tapahtumasta seuraus on juuri se, kumpi näistä tapahtuu myöhemmin. Mutta tällaisen määritelmän käyttö olisi kehällistä, eikä siksi sallittua. Reichenbach esittää, että kausaalisuus määrittelee kahden tapahtuman välille suhteen, jolla on suunta. Hänen mukaansa kausaalirelaatio on siis epäsymmetrinen relaatio, ja notaatio  $C(E_1, E_2)$  – jossa siis  $C$  tarkoittaa kausaalirelaatiota – määrittelee erilaisen suhteen kuin notaatio  $C(E_2, E_1)$ . (Reichenbach 1958, 136.)

Kausaalirelaation epäsymmetrisyyden Reichenbach (1958, 137) sanoo johtuvan siitä, että jos  $E_1$  on  $E_2$ :n syy, niin silloin pienet variaatiot  $E_1$ :ssä siirtyvät  $E_2$ :een, mutta variaatiot  $E_2$ :ssa eivät siirry  $E_1$ :een. Olkoon nyt  $E^*$  tapahtuma, jossa havaitaan pieni variaatio \* tapahtumasta  $E$ , jossa ei ole tällaista variaatiota. Nyt Reichenbach (1958, 137) väittää, että jos  $E_1$  on aikaisempi kuin  $E_2$ , niin havaitsemme vain tapahtumapareja  $E_1E_2$ ,  $E_1^*E_2^*$  ja  $E_1E_2^*$ , mutta emme koskaan tapahtumaparia  $E_1^*E_2$ . Täten kausaalirelaatio määritteli näiden tapahtumien ajallisen järjestyksen, ja tapahtumaa  $E_2$  kutsutaan *seuraukseksi* ja täten *myöhemmäksi kuin*  $E_1$ . Tätä tapaa selvittää, kumpi tapahtumista on toista myöhempi kutsutaan *merkki-metodiksi* (mark method).

Reichenbachin ajatusta voidaan selventää seuraavalla esimerkillä: Tarkkaillaan kahta tapahtumaa  $E_1$  ja  $E_2$ , joita yhdistää valonsäde, ja jotka täten ovat kausaalisessa relaatiossa keskenään. Näiden ta-

<sup>31</sup> Huomautan, että valonsäde on nopein mahdollinen signaali, ja asettaa täten rajan kausaalisesti yhdistettävälle tapahtumille. Mikään kappale, jonka massa on suurempi kuin 0, ei voi kulkea valonnopeudella, sillä sen kiihdyttäminen valonnopeuteen vaatisi äärettömän määrän energiaa. Tämä voidaan nähdä esimerkiksi suhteellisuusteorian kaavasta  $E = m_0c^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , jossa nopeuden ( $v$ ) lähestyessä valonnopeutta ( $c$ ) energia ( $E$ ) lähenee ääretöntä.

pahtumien aikajärjestystä, tai sitä kumpi on kumman syy, ei vielä tiedetä. Nyt toiseen tapahtumaan voidaan liittää jokin merkki, vaikkapa yhdistää siihen punainen lasi, joka värjää valonsäteen punaiseksi tässä tapahtumassa ja kaikissa myöhemmissä tapahtumissa. Nyt siis merkittyjä (punaisia) tapahtumia ovat  $E_1^*$  ja  $E_2^*$  ja merkkeamattomia (valkoinen valo)  $E_1$  ja  $E_2$ . Havainnot koetilanteessa ovat Reichenbachin (1958, 137) mukaan sellaiset, että joko havaitaan 1) tapahtumapareja  $E_1E_2$ ,  $E_1^*E_2^*$  ja  $E_1E_2^*$ , mutta ei paria  $E_1^*E_2$  tai 2) havaitaan pareja  $E_1E_2$ ,  $E_1^*E_2^*$  ja  $E_1^*E_2$ , mutta ei paria  $E_1E_2^*$ . Toisin sanoen jos  $E_1$  on aikaisempi kuin  $E_2$ , niin ei voida havaita tilannetta, että  $E_1$  olisi merkitty punaisella valolla, mutta  $E_2$  olisikin valkoinen (eli paria  $E_1^*E_2$ ). Jos taas  $E_2$  on aikaisempi kuin  $E_1$ , ei voi havaita tilannetta, jossa  $E_2$  olisi merkitty, mutta  $E_1$ :ssä ei olisi merkkiä (eli paria  $E_1E_2^*$ ). Jos nyt koetilanteessa ei esimerkiksi havaita tilannetta, jossa  $E_1$ :ssä valonsäde on punainen ja  $E_2$ :ssa valo on valkoinen, mutta kolme muuta kombinaatiota havaitaan, niin voidaan päätellä, että  $E_1$  on  $E_2$ :n syy ja täten ajallisesti sitä aikaisempi (Reichenbach 1958, 137).

Reichenbach olettaa teoriassaan, että maailmassa ei ole suljettuja kausaalisia ketjuja. Suljetuista kausaalisista ketjuista seuraisi kausaalisen ajanteorian mukaan ajan kehämäisyys (suljettu aika). Reichenbachin mukaan tällaista ajallista paluuta identtiseen maailmantilaan ei ole havaittu, eikä sillä olisi merkitystä yksittäisille tapahtumille. Täten ne voidaan jättää hänen mukaansa määritelmän ulkopuolelle. (Reichenbach 1958, 139–141.) Tästä väitteestä eivät kuitenkaan esimerkiksi Grünbaum ja Van Fraassen ole Reichenbachin kanssa samaa mieltä, vaan heistä on tärkeää ottaa suljetun ajan mahdollisuus huomioon kausaalisessa ajanteoriassa. Reichenbach vaikuttaa olevan oikeassa siinä, että suljetun ajan mahdollisuus ei vaikuta kausaalisen teorian toimivuuteen, mikäli siinä sitoudutaan tiettyyn ajan kehän osaan. Jos kuitenkin kehän osa, johon on sitouduttu, muuttuu, niin samalla tapahtumien ajallinen järjestys saattaa vaihtua. Kausaalinen aikajärjestys olisi tällöin nähtävä jälleen *suhteellisena* riippuen siitä, mihin aikajaksoon sitoudutaan. Täten oltaisiin jälleen saman kysymyksen äärellä, kuin suhteellisuusteorian käsittelyssäkin: Mikä ajallinen viitekehys (valittu kehän osa) on ensisijainen muihin nähden? Suljetun ajan sisältävä maailma voidaan siis kuvitella, ja se on sinällään mahdollinen. Täten se mielestäni tulisikin ottaa aikajärjestyksen määrittelyssä huomioon.

Reichenbachin (1958, 143) määritelmän mukaan siis tapahtuma  $E$  edeltää toista tapahtumaa  $E'$ , jos  $E$ :stä voidaan lähettää signaali  $E'$ :uun. Koska valonnopeus on nopein mahdollinen signaali, niin on olemassa tapahtumia, joiden välillä ei ole mahdollista olla kausaalista signaalia. Tällaiset tapahtu-



mat siis ovat toisistaan riittävän kaukana avaruudellisesti ja riittävän lähellä ajallisesti, jotta valonsäde ei ehdi kulkea tapahtumien välillä. Reichenbach (1958, 144) esittää, että tällaisia tapahtumia kutsutaan *aikajärjestyksen suhteen ei-määräytyiksi*. Huomautan, että tällaisten tapahtumien (joiden välillä ei ole mahdollista kausaalista signaalia) *intervalli*  $s^2 = \Delta x^2 - c^2 \Delta t^2$  on positiivinen, kun kausaalisesti yhdistettävien tapahtumien intervalli on negatiivinen.

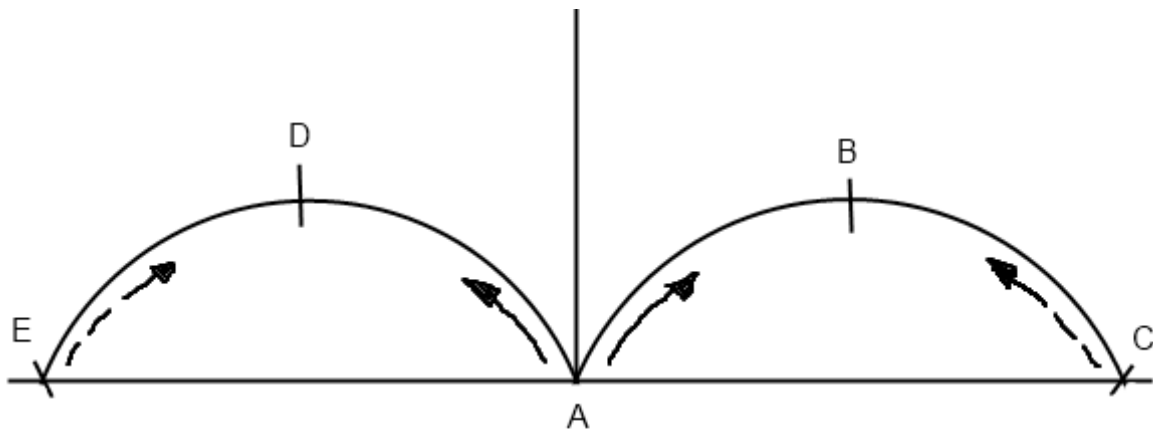
Nyt voidaan aina löytää viitekehys, josta katsottuna tapahtumat, jotka ovat aikajärjestyksen suhteen ei-määräytyjä, ovat suhteellisuusteorian samanaikaisuuden määritelmän mukaisesti laskettuna samanaikaisia keskenään. Täten Reichenbach (1958, 145) määrittelee kaikki tapahtumat, jotka ovat aikajärjestyksen suhteen ei-määräytyjä *samanaikaisiksi* keskenään. Tapahtumat ovat siis Reichenbachin teorian mukaan samanaikaisia, jos niiden välillä ei voi olla kausaalista yhteyttä, ja kausaalissa yhteydessä keskenään olevista tapahtumista aikaisempi on syy ja myöhempi on seuraus.

#### 4.1.2 Reichenbachin myöhempi teoria

Myöhemmässä teoriassaan Reichenbach erottelee selkeämmin toisistaan tapahtumien aikajärjestyksen ja ajan suunnan. Tämä teoria perustuu pitkälle aikaisempaan, mutta erään tärkeän huomion hän tekee ensimmäisestä teoriastaan. Uudessa teoriassaan Reichenbach tiedostaa erään edellisessä teoriassa olleen ongelman. Nimittäin sen, että suurin osa kausaalisista prosesseista ei määritä ajan suuntaa, sillä ne voivat olla käännettävissä olevia prosesseja. Luvussa kaksi käsiteltiin käännettäviä (eli ajankäännös-invariantteja) prosesseja, ja todettiin, että käännettävissä olevat prosessit ovat prosesseja, joiden ajassa käänteinen prosessi ei ole ristiriitainen fysiikan lakien kanssa. Reichenbach (1956, 32) esittääkin, että ajan suuntaa määritettäessä tarvitaan ei-käännettäviä prosesseja, kun taas aikajärjestys voidaan määrittää myös käännettävien prosessien avulla.

Aikajärjestyksen tarkastelu käännettävien prosessien avulla onnistuu Reichenbachin mukaan, jos tutkimme *välissä* relaatiota myöhemmin kuin relaation sijasta. Jos siis B on A:n ja C:n välissä, niin B on myös C:n ja A:n välissä. Välissä relaatio pystyy kuitenkin määrittelemään tapahtumien järjestyksen. Käännettävissä olevat kausaaliset prosessit siis kertovat, että on olemassa kausaalinen prosessi A:sta B:n kautta C:hen tai C:stä B:n kautta A:han. (Reichenbach 1956, 32.) Täten siis jokainen genidenttinen kausaalinen ketju on ajallisesti järjestetty, eli sen tapahtumat tapahtuvat tietyssä järjestyksessä, mutta tämän järjestyksen suuntaa ei voida määrittää käännettävien prosessien avulla.

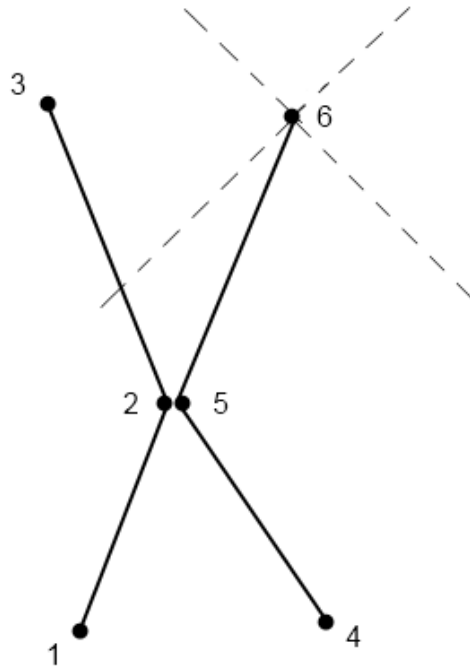
Reichenbach esittelee kuvan 4.1 kaltaisen tilanteen. Tässä kuvassa A:sta heitetään samanaikaisesti kaksi palloa eri suuntiin, toinen kohti C:tä ja toinen kohti E:tä, jolloin pallot kulkevat ehjien nuolten suuntaan. Tässä on siis kyseessä kaksi samaan aikaan tapahtuvaa kausaalista, käännettävää prosessia. Nyt kummankin prosessin ajallinen järjestys tiedetään, eli D on ajallisesti A:n ja E:n välissä ja B on ajallisesti A:n ja C:n välissä. Sitä ei kuitenkaan tiedetä, kumpaan suuntaan kumpikin näistä prosesseista kulkee. Jos ajan suuntaa ei tiedetä ennalta, niin on aivan yhtä mahdollista havaintojen perusteella tulkita, että pallot heitetään E:stä ja C:stä ja ne törmäävät A:ssa (pallot kulkisivat katkonaisten nuolten suuntaan), kuin että pallot heitetään A:sta ehjien nuolten suuntaan. Reichenbach esittää, että havaintoja ei voida tulkita siten, että pallojen liikesuunnat olisivat samat. Toisin sanoen joko molemmat pallot kulkevat katkonaisten nuolten suuntaan tai molemmat pallot kulkevat ehjien nuolten suuntaan, mutta pallot eivät voi kulkea siten, että toinen kulkee ehjän ja toinen katkonaisen nuolen suuntaan. (Reichenbach 1956, 33.) Seuraavaksi Reichenbachin tavoitteena on osoittaa, että kahdella tai useammalla prosessilla on sama ajallinen suunta, eli että niiden suunnat ovat riippuvaisia toisistaan.



Kuva 4.1 (Kahden pallon heittäminen joko A:sta E:hen ja C:hen tai C:stä ja E:stä A:han)

Tämän ongelman ratkaisemiseksi Reichenbach tuo teoriaansa *likimääräisen koinvidenssin* käsitteen. Reichenbachille (Ks. Esim. 1969, 16–21) koinvidenssi on määritelty havaintojen perusteella kahden tapahtuman mahdollisimman pienen mittavirheen sallimaksi läheisyydeksi. Tätä mittavirheen sallimaa eroa on mahdollista lisätä ja määritellä tällä tavalla myös tapahtumien likimääräinen koinvidenssi.

Nyt voidaan tutkia, mitä kuvan 4.1 tapahtuman A ympäristössä havaitaan. Reichenbachin (1956, 34) mukaan havainnot ovat seuraavan aika-avaruus diagrammin (Kuva 4.2) kaltaiset. Riippumatta siitä kumpaan suuntaan aika kulkee, havaitaan kahden pallon törmäävän tapahtumassa A. Havaitaan siis tiukka koincidenssi 2-5, joka kuvaa pallojen törmäämisen hetkeä. Hetkeä tätä aiemmin (tai myöhemmin, riippuen ajan suunnasta) havaitaan likimääräinen koincidenssi 1-4 ja hetkeä myöhemmin (tai vastaavasti aiemmin) toinen likimääräinen koincidenssi 3-6. Jos pallojen liikesuunnat olisivat samat (toinen pallo kulkisi katkonaisen ja toinen ehjän nuolen suuntaan), havaittaisiin koincidenssit 1-6, 2-5 ja 3-4. Reichenbachin (1956, 34) mukaan tällaisessa tilanteessa ei havaita näitä koincidenssejä, joten pallojen liikesuunnat eivät voi olla samat.

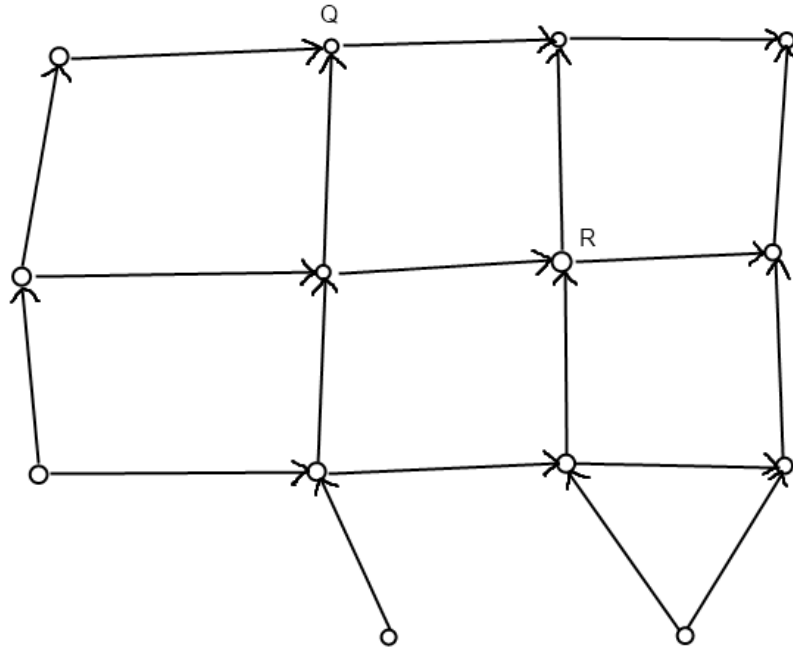


**Kuva 4.2 (Kuvan 4.1 tapahtuman A kuvaus aika-avaruusdiagrammin avulla)**

Mielestäni edellä kuvatussa tilanteessa voidaan kuitenkin aivan hyvin havaita myös koincidenssit 1-6, 2-5 ja 3-4, mikäli likimääräisyyttä laajennetaan enemmän. Kyse onkin vain siitä, että koincidenssit 1-4, 2-5 ja 3-6 ovat *tiukempia* kuin koincidenssit 1-6, 2-5 ja 3-4. Tätä Reichenbach ei mainitse, vaan hän esittää, että on vain yksinkertaisesti havaintojen avulla mahdollista erottaa kahden rinnakkaisen prosessin paikallinen aikajärjestys (Reichenbach 1956, 35). Voimme kyllä empiirisesti tode-

ta toisten koincidenssien olevan tiukempia kuin toisten, ja tukeutua tähän, mutta tämä ei siltikään suoranaisesti kiellä näiden löysempien koincidenssien havaittavuutta. Van Fraassen esittääkin, että paikallista aikajärjestystä ei tarvitse olettaa empiirisesti tunnetuksi, sillä voimme palauttaa koincidenssin ”tiukkuuden” kausaalisen yhdistettävyyden käsitteeseen. Kuvasta 4.2 voidaan siis havaita, että 1 ja 6 ovat kausaalisesti yhdistettävissä (piirretään tapahtuman 6 valokartio katkoviivoilla), mutta tapahtumat 3 ja 6 eivät. Tällä tavalla voidaan määritellä, että tapahtumat 3 ja 6 ovat koincidettiset (likimääräisesti), mutta 1 ja 6 eivät, koska ne ovat kausaalisesti yhdistettävissä. Näin Reichenbachin ongelma selvitetään helposti, ja tässä tapauksessa ei jouduta kaltevan pinnan argumentin kohteeksi. (Van Fraassen 1970, 177–178.)

Nyt on osoitettu, että kahden toisiinsa (jonkin koincidenssin kautta) liittyneen kausaalisen prosessin suunnat ovat aina toisistaan riippuvaisia. Siis kun toisen prosessin suunta on annettu, niin toisenkin suunta tiedetään. Tämän huomion jälkeen voidaan maailman tapahtumista rakentaa kausaalinen verkko (Kuva 4.3), joka on *lineaalisesti järjestetty* (Reichenbach 1956, 36–37). Lineaalisella järjestyksellä tarkoitetaan tässä, että jos yhden kausaaliprosessin suunta vaihdetaan, niin kaikkien muidenkin prosessien suunta vaihtuu. Kausaalinen verkko ei Reichenbachin (1956, 37) mukaan edelleenkään sisällä suljettuja ketjuja, eli mikään kausaalinen prosessi ei johda itseensä muiden nuolien kautta. Tämän hän perustelee jälleen vain empiirisesti, eli tällaisia suljettuja ketjuja ei yksinkertaisesti havaita. Verkon nuolet ovat siis kausaalisia prosesseja ja solmukohdat koincidenssejä, joihin juuri edellä mainittu likimääräinen koincidenssi ja paikallinen aikajärjestys liittyvät.



Kuva 4.3 (Kausaalinen verkko)

Kausaaliverkon kaikki tapahtumat voidaan myös järjestää ajallisesti käyttämällä edellä mainittua välissä relaatiota ja samanaikaisuuden määritelmää. *Samanaikaisiksi* tapahtumiksi Reichenbach ymmärtää edelleen tapahtumat, joiden välillä ei ole mahdollista kausaalista ketjua. Esimerkiksi kuvassa 4.3 tapahtumat Q ja R ovat samanaikaisia, sillä niiden välillä ei ole samansuuntaisten nuolien yhdistämää ketjua. Uudessa teoriassa Reichenbach määrittelee, että jos A on kausaalisen ketjun alussa ja B lopussa, niin B tapahtuu *myöhemmin kuin* A. (Reichenbach 1956, 38–39.) Koska kausaaliketjujen suunnat on sidottu toisiinsa, niin tässä uudessa teoriassa riittää löytää yksi ketju, jonka suunta tiedetään. Tällaisia kausaaliketjuja Reichenbachille ovat erityisesti termodynaamiset prosessit, joita käsitellään myöhemmin. Itse asiassa Reichenbach (1956, luku 23) esittää, että edellä esitellyllä *merkki-metodilla* voidaan selvittää kausaaliketjun suunta, kunhan merkkautapahtuma on prosessi, jossa systeemin entropia kasvaa. Nyt on nähty, millä tavalla Reichenbach ratkaisee ongelman, joka koski aikajärjestyksen määrittämistä käännettävien prosessien avulla.

#### 4.1.3 Grünbaumin kausaalinen ajanteoria

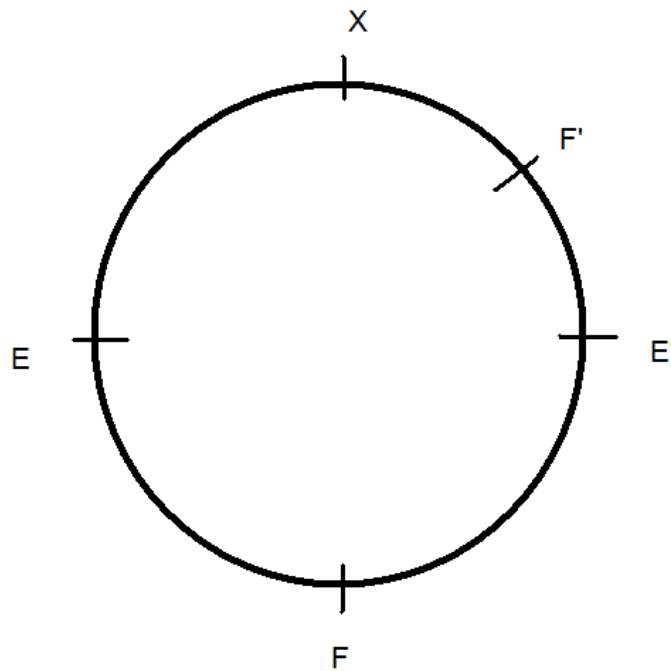
Myös Grünbaum kehittää oman versionsa kausaalisesta ajanteoriasta. Omassa teoriassaan Grünbaum tekee selväksi, että hänelle kausaalirelaatio on primitiivinen. Hänen mukaansa tämä on välttämätön oletus, jos kausaalirelaation avulla halutaan määritellä ajallinen välissä relaatio ja samanaikaisuus.

kaisuus. Tämä johtuu siitä, että jos kausaalirelaatiot ajatellaan käännettäviksi, niin silloin kausaalirelaatio on symmetrinen. Koska kausaalirelaation symmetrisyys johtaa hänen mukaansa genidenttisten (kausalisesti yhdistettävien) tapahtumien ekvivalenttisuuteen, niin symmetristä kausaalirelaatiota ei voida mielekkäästi määritellä. (Grünbaum 1963, 190–191.) Lisäksi Grünbaum ottaa teoriassaan erityisesti huomioon myös suljetun (kehämäisen) ajan mahdollisuuden.

Grünbaum määrittelee *n-neliköksi* (n-quadruplet) neljän tapahtuman (E, L, E' ja M) ryhmän, jos ja vain jos tapahtumien E ja E' tapahtuessa välttämättä myös L tai M (jotka ovat genidenttisiä E:n ja E':n kanssa) tapahtuu, jotta E ja E' voisivat olla genidenttisiä. Merkinnällä  $n(E\ L\ E'\ M)$  tarkoitetaan, että E, L, E' ja M muodostavat n-nelikön. (Grünbaum 1963, 193–194.) Tämä n-nelikkö voidaan ymmärtää siten, että L tai M (tai molemmat) erottaa *jossakin* genidenttisessä ketjussa E:n ja E':n, eli jompikumpi on ajallisesti niiden välissä tässä yhdessä ketjussa. Tähän tulkintaan n-neliköstä liittyy yksi Grünbaumin teorian ongelma, johon palataan myöhemmin, mutta tässä vaiheessa mainittu tulkinta toimikoon havainnollistamisen välineenä. Se, että L tai M sijaitsevat ajallisesti E:n ja E':n välissä yhdellä genidenttisellä ketjulla, ei kuitenkaan tarkoita, että L:n tai M:n tulisi sijaita kaikilla E:n ja E':n välisillä genidenttisillä ketjuilla. Yhdellä ketjulla sijaitseminen riittää takaamaan, että ne tapahtuvat aina, kun E ja E' ovat genidenttisiä.

Seuraavaksi Grünbaum määrittelee *n-ketjun* (n-chain) käsitteen: Jos E ja E' ovat tapahtumia, niin ryhmää  $\alpha$  kutsutaan E:n ja E':n yhdistäväksi n-ketjuksi, jos ja vain jos  $\alpha$ :n kaikki jäsenet X toteuttavat seuraavan ehdon:  $X \in \alpha$  *joss*  $(\exists F) [n(E\ X\ E'\ F) \wedge \neg n(E\ F\ E'\ F)]$ . Tämä määritelmä luetaan seuraavasti: Tapahtuma X kuuluu n-ketjuun  $\alpha$ , jos ja vain jos on olemassa sellainen tapahtuma F, että tapahtumat E X E' F muodostavat n-nelikön, mutta tapahtumat E F E' F eivät muodosta n-nelikköä. Jos nyt olisi  $n(E\ F\ E'\ F)$ , niin olisi välttämätöntä, että F tapahtuu E:n ja E':n ollessa genidenttiset, eli F erottaisi nämä tapahtumat, eikä X:n välttämättä täytyisi. Tässä määritelmässä löydetään siis sellainen F, että X ja F erottavat E:n ja E':n, mutta F ei tee sitä yksinään. Grünbaumin määritelmän mukaan kaikki tapahtumat X, jotka kuuluvat n-ketjuun  $\alpha$ , joka yhdistää E:n ja E':n, ovat *ajallisesti E:n ja E':n välissä*. (Grünbaum 1963, 194.) On syytä huomata, että tähän mennessä Grünbaumin ajallisen välissä relaation määritelmä toimii vain keskenään genidenttisille tapahtumille. Myöhemmin huomataan, miten Grünbaum laajentaa tätä määritelmää koskemaan myös ei genidenttisiä tapahtumia, mutta pysytään vielä hetki vain keskenään genidenttisten tapahtumien parissa.

Koska Grünbaumin mukaan hänen teoriansa tulisi toimia avoimessa ja suljetussa ajassa, niin tarkastellaan tämän määritelmän toimivuutta molemmissa tapauksissa. Olkoon aika ensin suljettu, eli kehämäinen, ja sellainen, että sen suunta ei ole tiedossa (kuten kuvassa 4.4). Oletetaan nyt, että  $X$  kuuluu  $\alpha$ :aan. Tämä tarkoittaa sitä, että löydetään sellainen  $F$ , että  $n(E X E' F)$  mutta ei  $n(E F E' F)$ . Koska nyt on  $n(E X E' F)$ , niin  $E$ ,  $X$ ,  $E'$  ja  $F$  ovat genidenttisiä keskenään. Nyt esimerkiksi kuvasta 4.4 huomataan, että suljetussa ajassa jokainen  $E$ :n ja  $E'$ :n kanssa genidenttinen tapahtuma on niiden välissä ajallisesti, joten myös  $X$  on niiden välissä ajallisesti.



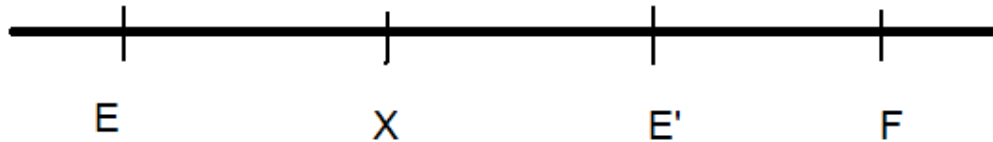
Kuva 4.4 (Suljettu aika ja ajallinen välissä relaatio)

Oletetaan nyt, että  $X$  on ajallisesti  $E$ :n ja  $E'$ :n välissä (ja siis niiden kanssa genidenttinen). Tällöin voidaan aina löytää jokin  $E$ :n,  $E'$ :n ja  $X$ :n kanssa genidenttinen tapahtuma  $F$  siten, että se erottaa  $E$ :tä ja  $E'$ :ä aikakehän ”toiselta puolelta” kuin  $X$ .<sup>32</sup> Täten huomataan, että jos  $E$  ja  $E'$  ovat genidenttiset, niin  $X$ :n tai  $F$ :n on tapahduttava, jolloin on  $n(E X E' F)$ . Nyt (kuten kuvasta 4.4 voidaan nähdä) ei  $F$ :n ole kuitenkaan välttämättä tapahduttava, jotta  $E$  ja  $E'$  voisivat olla genidenttiset. Geni-

<sup>32</sup> Tässä täytyy olettaa, että  $E$  ja  $E'$  eivät voi tapahtua niin lähekkäin ajassa, että niiden välille ei mahtuisi mitään tapahtumaa. Toisin sanoen oletuksena on, että aika on tiheä (dense).

denttinen ketju voi tässä tapauksessa olla myös kuvan 4.4 ympyrän ”yläkaari”. Ei siis ole niin, että  $n(E F E' F)$ . Täten ollen  $X \in \alpha$ , jos  $X$  on  $E:n$  ja  $E':n$  välissä. Kuvassa 4.4  $F'$  esittää tapahtumaa, jolle ei päde  $n(E X E' F')$ , sillä  $E$  ja  $E'$  voisivat olla genidenttisiä ilman, että  $X$  tai  $F'$  tapahtuu (koska kehän alakaarella ei ole niitä erottavaa tapahtumaa).

Tarkastellaan seuraavaksi avointa aikaa, jonka suuntaa emme taaskaan tiedä (katso kuva 4.5). Olkoon ensin niin, että  $X \in \alpha$ . Tehdään nyt vastaoletus, että  $X$  ei ole  $E:n$  ja  $E':n$  välissä ajallisesti, eli  $X$  ei erota niitä genidenttisessä ketjussa. Nyt on kuitenkin oletuksen ( $X \in \alpha$ ) mukaan olemassa  $F$  siten, että on  $n(E X E' F)$ , eli voimme löytää sellaisen genidenttisen ketjun, että  $X$  tai  $F$  erottaa  $E:n$  ja  $E':n$ . Vastaoletuksen mukaan  $X$  ei erota näitä kahta, joten  $F:n$  on erotettava ne. Tällöin olisi  $n(E F E' F)$  kaikilla  $F$  joille on  $n(E X E' F)$ , mikä on oletuksen  $X \in \alpha$  vastaista. Täten jos  $X \in \alpha$ , niin  $X$  on  $E:n$  ja  $E':n$  välissä ajallisesti.



**Kuva 4.5 (Avoin aika ja ajallinen välissä relaatio)**

Olkoon seuraavaksi  $X$  ajallisesti  $E:n$  ja  $E':n$  välissä, ja tarkastellaan kuuluuko  $X$   $\alpha$ :aan. Selvästi voidaan nyt löytää tapahtuma  $F$  siten että  $n(E X E' F)$ . Mutta koska  $X$  jo erottaa  $E:n$  ja  $E':n$ , niin voidaan valita sellainen  $F$ , joka ei erota näitä. Täten on siis olemassa sellainen  $F$ , että on  $n(E X E' F)$ , mutta ei ole  $n(E F E' F)$ . Siis jos  $X$  on  $E:n$  ja  $E':n$  välissä ajallisesti, niin  $X \in \alpha$ . Nyt on huomattu, että Grünbaumin määritelmä vaikuttaa toimivan niin avoimessa kuin suljetussakin ajassa.

Nyt ajallisesti  $E:n$  ja  $E':n$  välissä olevien tapahtumien joukko voidaan laajentaa koskemaan myös niitä tapahtumia, jotka eivät ole  $E:n$  ja  $E':n$  kanssa genidenttisiä. Tämä laajennus tapahtuu samanai-



kaisuuden määritelmän avulla. Tässä määritellään kaikki tapahtumat, jotka ovat samanaikaisia jonkin toisen tapahtuman kanssa, joka on  $E:n$  ja  $E':n$  välissä ja näiden kanssa genidenttinen, myös ajallisesti näiden välissä olevaksi. (Grünbaum 1963, 195.) *Topologisesti samanaikaisia* ovat Grünbaumin (1963, 203) mukaan kaksi tapahtumaa, jos ja vain jos ei ole fysikaalisesti mahdollista, että niitä yhdistää genidenttinen kausaaliketju. Koska valonnopeus antoi rajan kausaalisesti yhdistettävillä tapahtumilla, niin huomataan jälleen, että topologisesti samanaikaisia ovat tapahtumat, joiden intervalli on positiivinen.

#### 4.1.4 Van Fraassenin esitys kausaalisesta ajanteoriasta

Van Fraassenin esittämä versio on tähän mennessä systemaattisin muotoilu kausaalisesta ajanteoriasta. Hänen versionsa etenee postulaatein ja määritelmin, joissa ensin selkeästi määritellään tärkeät tekniset käsitteet, joita käytetään aikajärjestykseen liittyvissä määritelmissä. Primitiivisiä käsitteitä hänen teoriassaan ovat *tapahtuma*, *genidenttisyys* ja *kausallinen yhdistettävyyys*. Van Fraassen esittää (*Postulaatti 1*), että *genidentiteetti* on kaksipaikkainen ekvivalenssirelaatio (siis refleksiivinen, symmetrinen ja transitiivinen) tapahtumien välillä. Nyt hänen mukaansa (*Määritelmä 1*) *maailmanlinja* on luokka (merkitään tätä luokkaa  $W$ ) tapahtumia, joista mitkä kaksi tahansa ovat keskenään genidenttisiä, ja mikään tapahtuma, joka ei ole  $W:ssä$  ei ole kaikkien  $W:n$  tapahtumien kanssa genidenttinen. (Van Fraassen 1970, 183.) Tästä seuraa, että kaikki tapahtumat kuuluvat tasan yhdelle maailmanlinjalle, koska genidenttisyys on ekvivalenssirelaatio, ja siten jakaa tapahtumat ekvivalenssiluokkiin.

Seuraavaksi Van Fraassen olettaa (*Postulaatti 2*), että on olemassa ainakin kaksi toisistaan erillistä maailmanlinjaa. Lisäksi oletetaan (*Postulaatti 3*), että kausallinen yhdistettävyyys on kaksipaikkainen, symmetrinen ja refleksiivinen relaatio tapahtumien välillä ja että (*Postulaatti 4*) kahden tapahtuman ollessa genidenttisiä ne ovat kausaalisesti yhdistettävissä. Tärkeää tässä on huomata, että kausaalisuus ei ole transitiivinen relaatio toisin kuin genidenttisyys ja että kausaalisesta yhdistettävyydestä ei seuraa genidenttisyyttä. Nyt Van Fraassenin mukaan (*Määritelmä 2*) kaksi tapahtumaa ovat *topologisesti samanaikaisia*, jos ja vain jos ne eivät ole kausaalisesti yhdistettävissä. Lisäksi (*Määritelmä 3*) kaksi tapahtumaa ovat *koincidenttiset* jos ja vain jos kaikki tapahtumat, jotka ovat kausaalisesti yhdistettävissä toisen kanssa, ovat kausaalisesti yhdistettävissä myös toisen kanssa. (Van Fraassen 1970, 184.)

Tämän jälkeen Van Fraassen (1970, 185) esittää (*Postulaatti 5*), että jos tapahtuma  $E$  ei ole maailmanlinjalla  $W$ , niin  $W$  sisältää sellaiset tapahtumat  $E'$  ja  $E''$ , että  $E$  ja  $E'$  ovat topologisesti samanaikaiset sekä  $E$  ja  $E''$  ovat kausaalisesti yhdistettävissä. Nyt (*Määritelmä 4*)  $E$ :n samanaikaisuusluokka  $W$ :ssä (merkitään  $\text{Sim } W(E)$ ) on niiden tapahtumien luokka  $W$ :ssä, jotka ovat topologisesti samanaikaisia  $E$ :n kanssa. Nyt huomataan, että  $\text{Sim } W(E)$  on tyhjä, jos ja vain jos  $E$  on maailmanlinjalla  $W$ . Lisäksi (*Postulaateista 5 ja 2*) seuraa, että jokainen maailmanlinja on täysin samanaikaisuusluokkien peitossa. (Van Fraassen 1970, 185.) Tämä seuraus ymmärretään paremmin, kun huomataan, että jos maailmanlinjalta  $W$  valitaan mielivaltainen tapahtuma  $X$ , niin (*Postulaatin 2* mukaan) on olemassa toinen maailmanlinja  $W'$ , jolla (*Postulaatin 5* mukaan) on aina jokin tapahtuma  $X'$ , joka on topologisesti samanaikainen  $X$ :n kanssa. Nyt  $X$  kuuluu  $X'$ :n samanaikaisuusluokkaan  $W$ :ssä, joten kaikki  $W$ :n tapahtumat kuuluvat johonkin samanaikaisuusluokkaan.

Nyt Van Fraassenin (*Määritelmä 5*) mukaan *jatkuvien osien luokka maailmanlinjalla  $W$*  on pienin kokoelma  $W$ :n osia, joille pätee, että: (a) Jos  $E$  ei kuulu  $W$ :hen, niin  $\text{Sim } W(E)$  on  $W$ :n jatkuva osa. (b) Jos  $X_1$  ja  $X_2$  ovat  $W$ :n jatkuvia osia ja päällekkäisiä, niin niiden yhteinen osa on  $W$ :n jatkuva osa. (c) Jos  $X_1$  ja  $X_2$  ovat  $W$ :n jatkuvia osia ja päällekkäisiä, niin niiden summa on  $W$ :n jatkuva osa. Van Fraassen olettaa (*Postulaatti 6*), että jos  $E$  ja  $E'$  ovat tapahtumia maailmanlinjalla  $W$ , niin on olemassa  $W$ :n jatkuva osa  $P$ , johon molemmat  $E$  ja  $E'$  kuuluvat. Täten  $P$  yhdistää  $E$ :n ja  $E'$ :n. (Van Fraassen 1970, 185.) Tämä postulaatti takaa, että maailmanlinjalla ei ole aukkoja, vaan se koostuu täysin osittain päällekkäisistä jatkuvista osista.

Näiden peruspostulaattien ja määrittelyjen jälkeen Van Fraassen pääsee varsinaiseen aikajärjestyksen määrittelyyn. Hän määrittelee (*Määritelmä 6*), että jos tapahtumat  $E$ ,  $X$ ,  $E'$  ja  $Y$  ovat maailmanlinjalla  $W$ , niin  $X$  ja  $Y$  erottavat ajallisesti  $E$ :n ja  $E'$ :n (merkitään  $S(X, Y/E, E')$ ) maailmanlinjalla  $W$ , jos ja vain jos jokainen  $W$ :n jatkuva osa, joka yhdistää  $E$ :n ja  $E'$ :n, sisältää joko  $X$ :n tai  $Y$ :n. (Van Fraassen 1970, 186.) Tässä huomataan, että Van Fraassenille ajallinen välissä relaatio on ymmärrettävissä vain samalla maailmanlinjalla tapahtuvien (eli genidenttisten) tapahtumien välillä. Lisäksi tässä määritelmässä voidaan käyttää merkintää  $S(X, X/E, E')$  tarkoittamaan sitä, että tapahtuma  $X$  yksistäänkin erottaa  $E$ :n ja  $E'$ :n. Tämä tietenkin on mahdollista vain avoimen ajan tapauksessa, ja Van Fraassen erityisesti haluaakin säilyttää myös suljetun ajan mahdollisuuden.

Tärkeänä sivuhuomautuksena Van Fraassen tuo esille, että suljetun ajan ollessa kyseessä voitaisiin kuvitella, että kaikki tapahtumat ovat kausaalisesti yhdistettävissä keskenään. Siis voisi olla mahdollista lähettää todella hidas signaali jostakin tapahtumasta A ”koko ajan ympäri” toiseen tapahtumaan A', joka lokaalisesti katsoen olisi edellisen kanssa samanaikainen. Tämä tarkoittaisi, että mikään tapahtuma ei olisi toisen kanssa samanaikainen, ja tämä olisi postulaattia 5 vastaan. Nyt kuitenkin suhteellisuusteoriassa oletetaan valonnopeuden olevan rajoittava nopeus signaaleille, ja tätä voidaanakin käyttää hyväksi tällaisen ajan ympäri kulkevan signaalin kieltämiseen. Van Fraassen esittää, että valonnopeuden rajoittavuus voidaan määritellä siten, että jos maailmanlinjalta W, johon tapahtuma A kuuluu, lähetetään valonsäde (tapahtumasta E) tapahtumaan A', josta se heijastuu takaisin maailmanlinjalle W (tapahtumassa E'), niin minkään signaalin, jonka toinen päätepiste on A':ssa, toinen päätepiste ei voi ajallisesti erottaa tapahtumia E ja E'. Täten mikään signaali ei voi yhdistää A:ta ja A':a, ja tapahtumien samanaikaisuus voidaan Van Fraassenin mukaan pelastaa myös suljetun ajan tapauksessa. (Van Fraassen 1970, 186–187.)

Nyt Van Fraassenin (*Määritelmä 7*) mukaan funktio  $t$  on *topologisesti sallittu aika-koordinaatin määrittäminen*, jos ja vain jos (a)  $t$  kuvaa kaikki tapahtumat joko reaalilukusysteemille tai laajennetulle reaalilukusysteemille. (b) Jos E, X, E' ja Y kuuluvat samalle maailmanlinjalle W, niin  $t(X)$  ja  $t(Y)$  numeerisesti erottavat  $t(E)$ :n ja  $t(E')$ :n, jos ja vain jos X ja Y ajallisesti erottavat E:n ja E':n. (c) Jos E ja E' ovat koinsidenttisiä, niin  $t(E) = t(E')$ . (d) Jos E ja E' eivät ole koinsidenttisiä, niin  $t(E) \neq t(E')$  vain jos E ja E' ovat topologisesti samanaikaisia. Lisäksi Van Fraassen olettaa (*Postulaatti 8*), että *joko* kaikki sallitut aika-koordinaatin määrittämiset kuvaavat kaikki tapahtumat reaalilukusysteemille, *tai* kaikki sallitut aika-koordinaatin määrittämiset kuvaavat kaikki tapahtumat laajennetulle reaalilukusysteemille, *mutta ei molempia*. Postulaatista 8 seuraa, että kaikki maailmanlinjat ovat *joko* avoimia *tai* suljettuja, eivätkä ne voi olla esimerkiksi numeron 8 muotoisia topologiselta rakenteeltaan. Tästä sekä postulaatista 5 nähdään johtuvan myös, että kaikki maailmanlinjat kestävät yhtä kauan kuin itse maailmakin. (Van Fraassen 1970, 187.)

## 4.2 Kausaalisten ajanteorioiden kritiikki

Kausaalisia ajanteorioita vastaan on tietenkin esitetty myös kritiikkiä. Muun muassa Earman, Lacey ja Sklar ovat nostaneet esille tärkeitä kausaalisten ajanteorioiden ongelmia, joita seuraavaksi käsitellään.

### 4.2.1 Kritiikki Reichenbachin teoriaa vastaan

Grünbaum esittää kritiikkiä erityisesti Reichenbachin kausaalisen ajanteorian versiota vastaan. Yhtenä kritiikin kohteena on se, että Reichenbach ei huomioinut suljetun ajan mahdollisuutta teoriasaan, minkä Grünbaumin itse huomataan tekevän. Suurimmaksi osaksi Grünbaumin kritiikki kohdistuu kuitenkin Reichenbachin esittelemää merkki-metodia vastaan. Hänen mukaansa voidaan esimerkiksi kuvitella tilanne, jossa pimeän huoneen vasemmassa ja oikeassa seinässä on reiät, joiden välillä huoneen poikki kulkee valonsäde. Valon lähde on piilossa huoneen ulkopuolella, joten ei tiedetä, kummalta puolelta huonetta valo tulee, tai kumpaan suuntaan se liikkuu. Valitaan tämän selvittämistä varten kolme *tapahtumaparia* siten, että toinen parin osapuolista on aina toisessa päässä valonsädettä ja toinen toisessa. Tapahtumapari on siis sellainen, että molemmissa tapahtumissa on kyseessä sama fotoni (tai sama osa valonsädettä). Merkitään nyt tapahtumaparin tapahtumaa  $E_L$ , jos tapahtuma sijaitsee vasemmalla puolella valonsädettä ja  $E_R$ , jos tapahtuma sijaitsee oikealla puolella valonsädettä. Nyt merkitään molemmista päistä valonsädettä yksi kolmesta tapahtumasta punaisella lasilla (värjätään tämä fotoni punaiseksi). Lasi muuttaa valonsäteen punaiseksi tässä pisteessä ja sen tapahtumaparissa (ajatellaan valon kulkevan valkoisina tai punaisina fotoneina), mikäli tämä pari on ensin mainittua myöhempi. Käytetään merkintää  $E^*$  kuvaamaan merkittyä tapahtumaa  $E$ . (Grünbaum 1963, 182.)

Oletetaan nyt, että valonsäde kulkee vasemmalta oikealle, eli tapahtumat valonsäteen oikeassa päässä ovat myöhempiä kuin tapahtumat vasemmassa päässä. Grünbaum esittää, että tässä tapauksessa havaitaan vain kummassakin päässä valonsädettä olevat kolmen tapahtuman – aikajärjestyksen suhteen neutraalit – ryhmät: Voidaan esimerkiksi havaita vasemmalla oleva ryhmä ( $E_L \quad E_L \quad E_L^*$ ) sekä oikealla oleva ryhmä ( $E_R \quad E_R^* \quad E_R^*$ ).<sup>33</sup> Näiden havaintojen perusteella tulisi selvittää, kummat tapahtumat (valonsäteen oikeassa ja vasemmassa päässä olevat) ovat myöhempiä ja kummat aikai-

<sup>33</sup> Tässä siis yksi tapahtuma vasemmalla on merkattu ja kaksi tapahtumaa oikealla on merkattu. Tällainen havainto on mahdollinen, koska merkkejä voi syntyä prosessin aikana. Valo voi siis värjäytyä jossakin keskellä huonetta, ja tämä selittää, miksi oikealla kaksi tapahtumaa on merkattuja, mutta vasemmalla vain yksi.

sempia. Edellä mainituista havainnoista voidaan aivan yhtä hyvin päätellä, että on havaittu seuraavat tapahtumaparit:  $E_L E_R^*$ ,  $E_L E_R^*$  ja  $E_L^* E_R$ , mutta ei tapahtumaparia  $E_L^* E_R^*$ . (Grünbaum 1963, 183.) Tässä havaintojen tulkinnassa havaitaan siis myös tapahtumapari  $E_L^* E_R$ , joka oli juuri se pari, jonka merkki-metodin mukaan piti jäädä havaitsematta, jos  $E_R$  on myöhempi kuin  $E_L$ . Täten ei voida päätellä, että  $E_L$ :t tapahtuvat aikaisemmin kuin  $E_R$ :t.

Ajatuksena tässä on se, että ei voida tietää (eikä havaita), mikä tapahtuma oikeassa päässä valonsädetä on kytköksissä mihin tapahtumaan vasemmassa päässä. Tosin sanoen ei tiedetä, mikä oikealla havaittu fotoni on lähtöisin mistä tapahtumasta vasemmalla, eikä siis tiedetä, mitkä tapahtumat pitäisi ryhmittää pareiksi. Grünbaumin mukaan aikajärjestystä tarvitaan jo tapahtumaparien määrittämisessä. Liittääksemme pariksi ensimmäisen vasemmalla tapahtuvan tapahtuman ja ensimmäisen oikealla tapahtuvan tapahtuman, on meidän tiedettävä missä järjestyksessä tapahtumat tapahtuvat kummassakin päässä. Grünbaum esittääkin, että Reichenbach syyllystyy tässä kehämääritelmään. Aikajärjestystä määriteltäessä hänen täytyy olettaa tiedetyksi näiden (kolmen tapahtuman) ryhmien sisäiset aikajärjestykset. Jos parit kuitenkin on jo valmiiksi annettu (mikä ei siis ole selvää havaintojen perusteella), niin merkki-metodi toimii, ja määrittelee epäsymmetrisen prosessin, jos tietyt ehdot pitävät paikkansa. (Grünbaum 1963, 185.)

Tärkein näistä ehdoista on se, että merkkautapahtuma ei saa olla käännettävissä, eli merkin poistaminen ei saa olla mahdollista. Reichenbach itsekin tunnisti tämän ongelman, ja uudisti teoriaansa edellä mainitulla tavalla. Jos merkkautapahtuma on käännettävä, niin merkki voidaan poistaa matkalla olevasta signaalista, ja kielletty tapahtumapari  $E_L^* E_R$  on täysin mahdollinen. Tällaisen virheen estämiseksi Reichenbachilla on kaksi vaihtoehtoa: Hän voi ottaa käyttöönsä vain ei-käännettävissä olevat prosessit, tai hän voi olettaa, että kyseessä oleva systeemi on suljettu aikavälillä  $E_L^*$ :stä  $E_R$ :ään (Grünbaum 1963, 185).

Jos oletetaan, että systeemi on suljettu tällä *aikavälillä*  $E_L^*$ :stä  $E_R$ :ään, niin tässä jälleen täytyy olettaa, että ajallinen välissä relaatio on määritelty aikaisemmin. Ajallista välissä relaatiota ei kuitenkaan ole määritelty merkki-metodin yhteydessä, joten systeemin suljettavuutta ei voida tässä tapauksessa käyttää hyväksi. (Grünbaum 1963, 185–186.) Jotta systeemin siis voitaisiin sanoa olevan suljettu jonkin kahden tapahtuman *välisinä* ajanhetkinä, niin tulee ensin määritellä ajallinen välissä

relaatio. Täten Reichenbachin onkin tyydyttävä vain ei-käännettävien prosessien käyttämiseen aikajärjestystä määriteltäessä.

Kuten edellisessä luvussa kävi ilmi, niin Reichenbach valitseekin näistä kahdesta vaihtoehdosta juuri ei-käännettävät prosessit ja kehittää niiden pohjalta verkkomallisen teorian. Kuitenkin jos tukeudumme vain ei-käännettäviin prosesseihin, meidän on luovuttava ajatuksesta, että kaikki kausaaliset prosessit voisivat määrittää aikajärjestystä. Suurin osa kausaalisista prosesseista on käännettävissä, ja tavoitteena olisi esittää teoria, joka toimii kaikkien kausaalisten prosessien kanssa.

#### 4.2.2 Grünbaumin version kritiikki

Grünbaum oletti omassa versiossaan, että kausaalirelaatio on symmetrinen. Tästä symmetrisyydestä näyttää kuitenkin seuraavan, että jos E ja F ovat genidenttisiä, niin voidaan ajatella E:n olevan F:n syy tai F:n olevan E:n syy. Tällöin E:n ja F:n eksistenssit tulisivat identtisiksi. Tästä seuraa, että kaikkien E:n ja E':n kanssa genidenttisten tapahtumien on tapahduttava, jos nämä kaksi tapahtuvat. Voidaan esimerkiksi ajatella, että X, E ja E' ovat genidenttisiä tapahtumia avoimessa ajassa, ja X ei erota E:tä ja E':a. Nyt on mahdotonta, että E ja E' tapahtuvat, jollei myös X tapahdu, koska genidenttisten tapahtumien olemassaolo oli ekvivalenttista. Tässä tapauksessa Grünbaumin määritelmän mukaan olisi  $n(E \ X \ E' \ X)$ , eli X:n on tapahduttava, jotta E ja E' voisivat olla genidenttiset. Tässä tapauksessa siis X olisi E:n ja E':n välissä, vaikka juuri sanottiin, ettei se erota näitä.

Saman vastaväitteen voidaan nähdä pätevän tietyssä tapauksessa myös, vaikka kausaalirelaatio ei olisi symmetrinen. Vastaväite nimittäin pätee, jos oletetaan tapahtumien determinismi. Jos siis oletetaan, että E ja E' tapahtuvat, niin näistä tapahtumista seuraa välttämättä determinismin mukaan tietyt toiset tapahtumat, jotka eivät ole ajallisesti näiden välissä. Lisäksi tapahtumista E ja E' voidaan deterministisesti päätellä, mistä tapahtumista ne ovat seurausta, eli tietyt niitä ennenkin tapahtuvat tapahtumat ovat välttämättömiä niiden olemassaololle. Toisaalta, jos kausaalirelaation voidaan osoittaa olevan epäsymmetrinen (niin kuin voitaisiin tiettyjen ajankäännös-epäinvarianttien prosessien kohdalla tehdä), niin tämän epäsymmetrisen relaation avulla voidaan määritellä aikajärjestys ja ajan suunta, eikä Grünbaumin määritelmää ajallisesta välissä relaatiosta tarvittaisi lainkaan.

Vastauksena edellä esitettyyn vastaväitteeseen Grünbaum ehdottaa, että meidän on eroteltava toisistaan seuraavat ominaisuudet: 1) välttämätön tapahtuma E:n ja E':n olemassaololle ja 2) välttämätön tapahtuma E:n ja E':n genidenttisyydelle, kun E:n ja E':n olemassaolo on annettu. Tämän erottelun avulla selvittää ongelmosta, sillä vaikka kaikilla E:n ja E':n kanssa genidenttisillä tapahtumilla on ensin mainittu ominaisuus, niin vain ajallisesti niiden välissä olevilla tapahtumilla on myös toinen ominaisuus. (Grünbaum 1963, 196–197.)

Grünbaumin teoriaa jää kuitenkin vaivaamaan epistemologinen ongelma: miten voidaan tietää, mitkä tapahtumat ovat välttämättömiä tapahtumien E ja E' olemassaololle ja mitkä tapahtumat ovat välttämättömiä olemassaolon lisäksi niiden genidenttisyydelle. Selvästikään tätä ei voida ratkaista a priori, ja vaikuttaa myös siltä, että edes a posteriori tätä eroa ei voida tehdä. Tapahtumat, jotka ovat välttämättömiä tapahtumien E ja E' genidenttisyydelle, ovat nimittäin välttämättömiä myös näiden olemassaololle. Tapahtumien E ja E' genidenttisyydelle välttämättömien tapahtumien joukko (E:n ja E':n välissä olevat niiden kanssa genidenttiset tapahtumat) on siis osajoukko tapahtumien E ja E' olemassaololle välttämättömien tapahtumien joukosta (kaikki E:n ja E':n kanssa genidenttiset tapahtumat). Täten aina kun havaitaan E:n ja E':n olemassaololle välttämättömät tapahtumat, niin havaitaan myös niiden genidenttisyydelle välttämättömät tapahtumat. Toisaalta taas E:n ja E':n genidenttisyys edellyttää niiden olemassaoloa, joten kun havaitaan niiden genidenttisyydelle välttämättömät tapahtumat, niin havaitaan myös niiden olemassaololle välttämättömät tapahtumat. Toisin sanoen nämä tapahtumajoukot havaitaan aina yhdessä, eikä havaintojen avulla siksi voida tehdä eroa näiden kahden joukon (genidenttisyydelle välttämättömien tapahtumien ja olemassaololle välttämättömien tapahtumien) välillä.

Lisäksi esimerkiksi Hugh M. Lacey esittää kritiikkiä koskien kausaalista ajanteoriaa. Hänen ensimmäinen kritiikkinsä kohdistuu nimenomaisesti Grünbaumin versioon teoriasta ja koskee n-ketjun määritelmää. Lacey esittää, että yhtäkään n-ketjua ei ole olemassa, sillä mikään tapahtuma ei ole välttämätön E:n ja E':n genidenttisyydelle (eli mitkään tapahtumat eivät muodosta n-nelikköä). Hänen mukaansa siis n-ketjuja ei voi olla, koska n-nelikköjä ei ole olemassa. Tätä väitettä hän perustelee sillä, että vaikka X tai F olisivat tietyssä yhdessä genidenttisessä ketjussa E:n ja E':n välissä, niin on olemassa monta muutakin genidenttistä ketjua E:stä E':uun. Tällöin X tai F ei ole välttämätön E:n ja E':n genidenttisyydelle muuten kuin yhden ketjun sisällä. (Lacey 1968, 339.)

Lacey mukaan Grünbaumin täytyisikin sitoutua yhteen genidenttiseen ketjuun  $E:n$  ja  $E':n$  välillä, ja määritellä  $n$ -ketjuksi niiden tapahtumien joukko (merkitään tätä joukkoa  $S:llä$ ), jotka ovat  $E:n$  ja  $E':n$  välissä tällä yhdellä genidenttisellä ketjulla. Joukon  $S$  muodostavat siis tapahtumat  $X$ , jotka täyttävät tietyllä genidenttisellä ketjulla Grünbaumin vaatimuksen  $X \in S \text{ joss } (\exists F) [n(E X E'F) \wedge \neg n(E F E'F)]$ . Tällöin kuitenkin  $n$ -ketjun määritelmä on Lacey mukaan kehällinen, mikä johtuu siitä, että siinä käytetään  $n$ -nelikön määritelmää. Nimittäin jotta nyt voidaan tietää, muodostavatko  $E$ ,  $X$ ,  $E'$  ja  $F$   $n$ -nelikön, niin täytyy Lacey mukaan olettaa joukon  $S$  olemassaolo, ja tietää, mitkä tapahtumat kuuluvat tähän joukkoon. Nyt siis  $n$ -nelikön määritelmässä oletetaan  $n$ -ketjun (joukon  $S$ ) olemassaolo ja tieto siitä, mitkä tapahtumat tähän kuuluvat, ja  $n$ -ketjun määritelmässä oletetaan  $n$ -nelikön olemassaolo ja tieto siitä, mitkä tapahtumat muodostavat  $n$ -nelikön. (Lacey 1968, 339–340.)

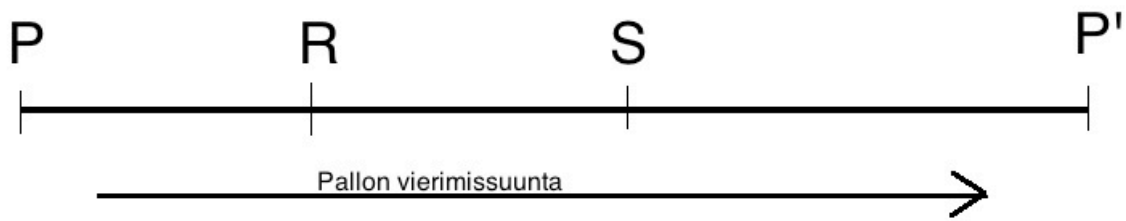
Lacey ei kuitenkaan selvästikään ota huomioon, että tapahtumat, jotka ovat  $E:n$  ja  $E':n$  välissä yhdellä genidenttisellä ketjulla tapahtuvat aina, kun  $E$  ja  $E'$  ovat genidenttisiä. Tämä on selvää, kun huomaa, että jokainen yhdellä  $E:n$  ja  $E':n$  kanssa genidenttisellä ketjulla ja niiden välissä oleva tapahtuma on *samanaikainen* ainakin jonkin yhden tapahtuman kanssa, joka sijaitsee mielivaltaisella  $E:n$  ja  $E':n$  kanssa genidenttisellä ketjulla ja on niiden välissä. Täten kaikki tapahtumat, jotka ovat genidenttisiä  $E:n$  ja  $E':n$  kanssa ja ovat niiden välissä tapahtuvat siis välttämättä, kun  $E$  ja  $E'$  ovat genidenttisiä, ja ovat siten *välttämättömiä* niiden genidenttisyydelle.  $N$ -neliköitä on siis olemassa, ja täten myös  $n$ -ketjuja on olemassa ilman, että olisi tarpeen sitoutua vain yhteen ketjuun tapahtumien  $E$  ja  $E'$  välillä. Tällöin ei myöskään mitään kehämääritelmää pääse syntymään. Toisin sanoen Lacey ymmärtää mielestäni väärin sen, mitä Grünbaum tarkoittaa sillä, että  $X$  tai  $F$  on välttämätön  $E:n$  ja  $E':n$  genidenttisyydelle. Lacey'n tulkinta on se, että  $X:n$  tai  $F:n$  olisi havaittava tapahtuvan aina sillä mielivaltaisella genidenttisellä ketjulla, mikä kulloinkin satutaan valitsemaan. Grünbaumia tulisikin mielestäni tulkita siten, että  $X$  tai  $F$  tullaan aina välttämättä havaitsemaan, jos  $E$  tai  $E'$  ovat genidenttisiä, mutta niiden ei tarvitse sijaita tietyllä valitulla ketjulla. Pelkästään se, että  $X$  tai  $F$  sijaitsee jollakin ketjulla  $E:n$  ja  $E':n$  välissä takaa sen, että ainakin toinen niistä tapahtuu aina, kun  $E$  ja  $E'$  tapahtuvat ja ovat genidenttisiä –  $X:n$  tai  $F:n$  tapahtuminen on siis *välttämätöntä*  $E:n$  ja  $E':n$  genidenttisyydelle.



### 4.2.3 Yleinen kritiikki kausaalisia teorioita vastaan

Toinen Lacey esittämä kritiikki on yleisempi, ja koskee kaikkia aikajärjestyksen teorioita, jotka vetoavat genidenttisyysajan aikajärjestyksen määrittämisessä. Kahden tapahtuman genidenttisyysajan määriteltiin aiemmin tarkoittavan sitä, että sama kappale kokee nämä kaksi tapahtumaa eri ajanhetkinä. Lacey mukaan kahden tapahtuman genidenttisyys ei ole suoraan havaittava ominaisuus (se on tietenkin relaatio), ja siten genidenttisyysajan tietämiseen vaaditaan ajallista kokemusta, joka sisältää myös aikajärjestyksen käsitteen. Tällöin genidenttisyysajan määrittely vaatisi aikajärjestyksen määrittelyä, mutta koska aikajärjestys määritellään genidentiteetin avulla, niin päädytään kehämääritelmään. (Lacey 1968, 341.)

Tämän väitteen havainnollistamiseksi Lacey esittää kuvan 4.6 kaltaisen tilanteen, jossa pallo vierii tapahtumasta P tapahtumaan P'. Nyt kaikki tapahtumat tällä pallon vierimisradalla ovat keskenään genidenttisiä (eli P, R, S ja P' ovat genidenttisiä keskenään). Jos tässä esimerkissä ei saada olettaa tapahtumien aikajärjestyksestä tiedetyksi, niin silloin voidaan Lacey mukaan aivan yhtä hyvin olettaa, (1) että pallo vierii ensin P:stä R:ään, sitten S:stä P':uun ja vasta sen jälkeen R:stä S:ään, kuin voitaisiin olettaa, (2) että pallo vierii P:stä R:ään, siitä S:ään ja siitä P':uun. Näiden kahden tulkinnan välillä *ainoa* ero on prosessien ajallinen järjestys, eikä tätä järjestystä oletuksen mukaan ole tiedossa. Nyt Lacey esittää, että jos genidentiteetin ajatellaan olevan välttämättä jatkuvaa, niin silloin tulkinta (2) on genidenttinen prosessi, mutta tulkinta (1) ei ole genidenttinen prosessi. Koska näiden tulkintojen välillä ainoana erona oli aikajärjestys, niin genidenttisyys vaatii aikajärjestyksen tietämistä. Tämä taas ei ole sallittua kehämääritelmän uhalla. Jos taas genidentiteetti ei oleteta olevan jatkuvaa, niin molemmat edellä mainitut tulkinnat ovat genidenttisiä, eikä genidentiteetin avulla siten voida määrittellä aikajärjestyksestä. (Lacey 1968, 343–344.) Esimerkiksi Van Fraassenin nähtiin ottavan genidentiteettiä perustavana käsitteenä, jolloin sitä ei voitaisi tällä tavalla analysoida. Genidentiteetti ei kuitenkaan ole kovinkaan intuitiivinen käsite tai – ainakaan Lacey mukaan – suoraan havaittavissa, joten mielestäni jonkinlainen genidentiteetin määritelmä pitäisi antaa ennen kuin sitä voidaan käyttää ajallisen järjestyksen teorioissa.



Kuva 4.6 (Pallo vierii tapahtumasta P tapahtumaan P'.)

Mielestäni Lacey'n vastaväitteen voidaan nähdä kulminoituvan identiteetin määritelmään. Mitä tarkoittaa, että kyseessä on *sama* pallo kaikissa edellä mainituissa prosesseissa (vierimisessä P:stä R:ään, vierimisessä R:stä S:ään ja vierimisessä S:stä P':uun)? Perinteisessä mielessä identiteettiä on pidetty ajallisena ja paikallisena jatkuvuutena, joten tässä mielessä tulkinnassa (1) ei ole kyse genidentiteetistä, sillä pallo ei ole *sama* kaikissa prosesseissa. Nyt kysymys kuuluukin, että oletetaanko identiteetin määrittelyssä aikajärjestys tiedetyksi. Voiko toisin sanoen jatkuvuutta olla ilman aikajärjestystä? Matemaattisesti määriteltynä funktio  $f$  on jatkuva pisteessä  $c$ , jos sillä on raja-arvo tässä pisteessä. Raja-arvo  $L$  funktiolla  $f$  taas on määritelmän mukaan olemassa pisteessä  $c$ , jos kaikilla  $\epsilon > 0$  on olemassa  $\delta > 0$  siten, että  $|f(x) - L| < \epsilon$ , aina kun  $0 < |x - c| < \delta$ . Tämän määritelmän mukaan selkeästi täytyy tietää, että luku sijaitsee kahden toisen luvun välissä, jotta jatkuvuus voitaisiin osoittaa. Täten voitaisiin helposti kuvitella, että myös aikajärjestys (eli ajallinen *välissä* relaatio) olisi tarpeellinen identiteetin määrittelyssä. Tämä kysymys täytyy kuitenkin tässä yhteydessä jättää avoimeksi, mutta todettakoon, että tässä voidaan nähdä jälleen yksi aikajärjestykseen liittyvä filosofinen ongelma, joka kaipaisi lisähuomiota.

Myös Earman on esittänyt kritiikkiä kausaalista ajanteoriaa vastaan. Hän esittää muun muassa, että kausaalinen teoria ei voi toimia, jollei se määrittele tapahtumien identiteettiehtoja. Toisin sanoen koincidenssi tulee määritellä eksplisiittisesti kausaalisessa teoriassa. Van Fraassen määritteli koincidentisiksi tapahtumat, jos ja vain jos ne ovat kausaalisesti yhdistettävissä samojen tapahtumien kanssa. Toisin sanoen jos niiden *valokartiot*<sup>34</sup> ovat samat. Merkitään nyt tapahtuman  $x$  valokartion

<sup>34</sup> Tapahtuman  $x$  valokartiolla tarkoitetaan tapahtumasta  $x$  aika-avaruusdiagrammissa piirrettäviä kahta kartiota, joiden sivuina toimivat tästä tapahtumasta lähtevät valonsäteet. Yhdessä nämä kartiot muodostavat siis tiimalasin mallisen kuvaajan, jonka sisällä on kaikki tapahtumat, jotka ovat kausaalisesti  $x$ :n kanssa yhdistettävissä. Täten valokartion menneisyyteen osoittava puoli sisältää siis kaikki tapahtumat, joista voidaan lähet-

menneisyyteen osoittavaa puolta  $Ca_-(x)$  ja valokartion tulevaisuuteen osoittavaa puolta  $Ca_+(x)$ . Nyt Earman tuo ilmi, että Van Fraassenin koincidenssin määritelmä ei toimi, jos on olemassa  $x$ , jolle  $Ca_-(x)$  ja  $Ca_+(x)$  eivät ole erillisiä. (Earman 1972, 78.) Tällöin voisi olla niin, että kaksi selkeästi erillistä tapahtumaa olisivat määritelmän mukaan koincidenttisiä. Nyt voidaan huomata, että  $Ca_-(x)$  ja  $Ca_+(x)$  eivät ole erillisiä kaikille tapahtumille  $x$ , jos aika-avaruus sisältää suljettuja kausaalisia ketjuja, eli jos aika on suljettu. Grünbaum ja Van Fraassen kuitenkin erityisesti yrittävät ottaa tämän mahdollisuuden huomioon. Tästä syystä Van Fraassen kieltääkin (käyttämällä valon nopeuden asettamaa ylärajaa signaalien nopeudelle) signaalien lähettämisen ”koko ajan ympäri”, jolloin suljettuja kausaalisia ketjuja ei voisi muodostua. Toisaalta Van Fraassenin antamaa määritelmää valon nopeudesta voidaan kritisoida siitä, että se vaikuttaa olevan kehitetty vain avoimen ajan viitekehyksessä käytettäväksi. Täten Van Fraassenin koincidenssin määritelmä voidaan pelastaa käyttämällä tiettyä valon nopeuden asettaman rajan määritelmää, mutta tässä määritelmässä voisi olla myös lisäkritiikin aihetta.

Earmanin toinen kritiikki kohdistuu kausaalisten teorioiden premissiin, jonka mukaan aika on joko avoin tai suljettu. Hänen mukaansa aika tulisi kausaalisissa ajanteorioissa voida jakaa *ekvivalenssi-luokkia muodostaviin aikaviipaleisiin*, joilla sijaitsevat kaikki keskenään samanaikaiset tapahtumat. Earman esittää, että vain tällaisten aikaviipaleiden olemassaolon jälkeen voidaan muodostaa topologisesti sallittu ajan määrittäminen, eli funktio  $t$ , joka kuvaa tapahtumat joko reaalityksille (avoimen ajan tapauksessa) tai ympyrälle (suljetun ajan tapauksessa). (Earman 1972, 81–82.) Kausaalisen ajanteorian mukaan samanaikaisuusrelaatio ei kuitenkaan ole ekvivalenssirelaatio, sillä se *ei ole transitiivinen*. Tapahtuma  $E$  voi siis olla samanaikainen tapahtuman  $E'$  kanssa ( $E$  ja  $E'$  eivät ole kausaalisesti yhdistettävissä), ja  $E'$  voi olla samanaikainen tapahtuman  $E''$  kanssa, mutta tästä ei seuraa, että  $E$  ja  $E''$  olisivat samanaikaiset (nämä siis voivat olla kausaalisesti yhdistettävissä). (Ks. Esim. Reichenbach 1958, 145–146.) Täten aikaa ei voida jakaa tällaisiin aikaviipaleisiin, jotka Earman näkee tarpeellisenä avoimen tai suljetun ajan postuloimiseen. Earmanin (1972, 82) mukaan kausaalinen ajanteoria perustuukin väärälle dikotomialle, että aika olisi joko avoin tai suljettu, vaikka aika-avaruus ei välttämättä ole ajallisesti kumpaakaan.

---

tää signaali  $x$ :ään ja valokartion tulevaisuuteen osoittava puoli sisältää kaikki tapahtumat, joihin  $x$ :stä voidaan lähettää signaali.

Earmanin oma ratkaisu onkin ottaa aika-avaruus sinänsä perustavana, eikä sen tapahtumia ja niiden välisiä kausaalisia suhteita. Hänen mukaansa aika-avaruus sisältää tapahtumien välisiä spatiotemporaalisia relaatioita, joihin ei päästä käsiksi kausaaliiteetin avulla. Esimerkiksi aika-avaruus voi olla *ajallisesti suunnistuva*, vaikka aika ei olisi *järjestetty* tai avoin/suljettu. Järjestettävyyys (ja avoimuus tai kehämäisyys) vaatii Earmanin mukaan edellä mainitun aikaviipaleisiin jaettavuuden, mitä ajallinen suunnistettavuus ei vaadi. Earmanin ajatuksena on, että aika ja avaruus itsenäisinä käsitteinä ovat mystisiä, mutta moderni fysiikka on suhteellisen kotonaan aika-avaruuden käsitteen kanssa. Täten aika-avaruus pitäisikin ottaa primitiivisenä käsitteenä, jonka avulla tapahtumia, kausaalisuutta ja ajallisia suhteita voidaan analysoida. (Earman 1972, 81 ja 83–84.) Myös esimerkiksi Sklar (1974, 342–343) tuntuu jakavan tämän ajatuksen, ja hänen mukaansa on uskottavampaa palauttaa kausaaliset relaatiot spatiotemporaalisiin relaatioihin kuin toisinpäin. Earman ja Sklar siis ehdottavat täysin toista viitekehystä ajan tutkimisen suhteen. Tätä viitekehystä ei tässä tekstissä käsitellä sen enempää, mutta tästä uudesta viitekehyksestä voidaan kuitenkin esimerkiksi kysyä, ovatko perinteiset ajalliset käsitteet – kuten tapahtumien samanaikaisuus tai aikajärjestys – enää mielekkäitä siinä.

Mielestäni kuitenkin myös ajallisen suunnistuvuuden voidaan nähdä vaativan kausaalisissa ajanteorioissa määriteltyä ajallista välissä relaatiota. Kausaalirelaation symmetrisyydestä nimittäin seuraa, että tietyn tapahtuman (olkoon se tässä tapahtuma E) valokartion puoliskoja ei voida ratkaisevasti erottaa toisistaan ilman, että ajallinen välissä relaatio on määritelty. Tällöin toiseen E:n valokartion puoliskoon aluksi osoittanut ajankaltainen vektori voidaan tuoda takaisin E:hen tietämättä, että osoittaako tämä vektori nyt valokartion alkuperäiseen puoliskoon vai valokartion toiseen puoliskoon. Ensimmäisessä tapauksessa aika-avaruus on ajallisesti suunnistettu ja toisessa ei. Ainoa tapa erottaa E:n valokartion puoliskot toisistaan on sanoa, että E on ajallisesti näiden puoliskojen välissä. Toisin sanoen se, että jokin tapahtuma A on E:n valokartion toisella puoliskolla ja toinen tapahtuma B sen toisella puoliskolla, on sama asia kuin se, että E on ajallisesti A:n ja B:n välissä. Nyt voidaan huomata, että on kaksi tapaa, jolla voidaan tietää, ovatko kaksi mielivaltaista tapahtumaa X ja Y samalla vai eri E:n valokartion puoliskolla keskenään. Toinen tapa on osoittaa, että ne eivät ole kausaalisesti yhdistettävissä, jolloin niiden on oltava samalla puoliskolla. Tämä tapa ei kuitenkaan kerro sitä, ovatko kaksi kausaalisesti yhdistettävissä olevaa tapahtumaa samalla vai eri puoliskolla, joten tätä ei voida pitää ratkaisevana tapana selvittää ajallista suunnistuvuutta. Toinen tapa taas on osoittaa, että E on X:n ja Y:n välissä ajallisesti, jolloin X ja Y ovat eri puoliskoilla. Jos taas E ei ole X:n ja Y:n välissä ajallisesti, niin silloin X ja Y ovat samalla puoliskolla. Tämä tapa on selkeästi ratkaiseva tapa, jota voitaisiin käyttää ajallisen suunnistuvuuden todentamisessa. Koska ajallisen

suunnistuvuuden määrittelyssä oletetaan tiedetyksi tapahtumien valokartioiden puoliskojen erottelu, niin siinä oletetaan tiedetyksi myös ajallinen välissä relaatio. Ei siis voida ajatella, että ajallinen suunnistuvuus olisi ensisijaista kausaaliin ajanteorioihin nähden, ellei ajalliselle välissä relaatiolle anneta ensin jotakin toista määritelmää. Tällaista määritelmää ei ole toistaiseksi esitetty, joten ajallinen suunnistuvuus näyttää tarvitsevan pohjaksi ainakin jonkinlaisen kausaaliin ajanteorian.

## 5 TERMODYNAMIikka JA AJAN SUUNTA

Kausaalinen ajanteoria koski tapahtumien *aikajärjestystä*, mutta sen huomattiin olevan riittämätön kun yritettiin selvittää *ajan suuntaa*. Yhtenä vaihtoehtona ajan suunnan määrittämiseksi on ehdotettu termodynamiikassa esitettyyn *entropian* käsitteeseen pohjautuvaa määrittelyä. Tämä lähestymistapa vaikuttaa olevan fyysikkojen eniten suosima ratkaisu ongelmaan. (Ks. Esim. Hawking 1988, 145; Feynman 1985, 111–113 ja Penrose 1989, 394–407). Lyhyesti termodynaaminen ajan suunnan teoria sanoo, että entropian kasvun suunta määrittää ajan kulkusuunnan, eli tulevaisuuden suunnan. Tässä luvussa avataan entropian käsitettä klassisen termodynamiikan ja statistisen termodynamiikan näkökulmasta, jolloin huomataan, että entropia ja sen kasvu voivat olla moniselitteisiä käsitteitä. Tämän lisäksi esitellään termodynaaminen teoria ajan suunnasta ja tuodaan esille sen ongelmia, joiden nähdään seuraavan suurimmaksi osaksi modernista statistisesta termodynamiikasta.

### 5.1 Klassinen ja statistinen termodynamiikka

Termodynamiikan teoriat voidaan jakaa klassiseen ja statistiseen (moderniin) termodynamiikkaan. Klassisessa termodynamiikassa keskitytään systeemin makroprosesseihin. Makroprosessit ovat prosessien ihmiselle ilmenevä osa, mistä syystä klassisesta termodynamiikasta on käytetty myös nimitystä fenomenologinen termodynamiikka. Tällaisia ihmiselle ilmeneviä tai havaittavia ominaisuuksia systeemeissä ovat esimerkiksi niiden lämpötila, lämpömäärä ja systeemien tekemän työn määrä. Statistisessa termodynamiikassa taas tutkitaan systeemin mikroprosesseja, ja yritetään niiden avulla selittää termodynaamisia ilmiötä. Mikroprosesseja ovat systeemin hiukkasten liikkeet, joista makroprosessit ja havaittavat ominaisuudet johtuvat. Ajan suunnan kannalta termodynamiikassa olennaisia asioita ovat erityisesti *termodynamiikan toinen pääsääntö* ja *entropian* käsite. Toisen pääsäännön ja entropian käsitteen muotoilut kuitenkin eroavat selkeästi toisistaan klassisessa ja statistisessä termodynamiikassa.

#### 5.1.1 Klassinen termodynamiikka

Termodynamiikan toinen pääsääntö voidaan esittää klassisen termodynamiikan kautta ainakin kahdella tavalla. Lordi Kelvinin (William Thomson) määrittelemänä toinen pääsääntö sanoo, että systeemin on mahdotonta käydä läpi *kiertoprosessia*,<sup>35</sup> jossa se ottaa vastaan lämpömäärän yhdessä

---

<sup>35</sup> Kiertoprosessi on prosessi, jossa systeemi palaa prosessin lopuksi samaan tilaan, kuin missä se oli prosessin alkaessa.

lämpötilassa ja muuttaa sen kokonaan mekaaniseksi työksi (Young & Freedman 2011, 661). Kelvinin ajatuksena on se, että toinen pääsääntö kieltää ikiliikkujan rakentamisen siten, että systeemi muuttaisi lämpöä työksi ja työtä jälleen lämmöksi hukkaamatta energiaa (eli lämpöä) tässä kiertoprosessissa. Huomattava on, että kaikki työ, joka systeemiin tulee, on mahdollista muuttaa lämmöksi ja siirtää pois systeemistä, mutta kaikkea lämpöä, jonka systeemi tuottaa, ei voida muuttaa takaisin työksi (Lampinen 2010, 88). Rudolf Clausiuksen määrittelemänä toinen pääsääntö sitä vastoin esittää, että lämmön on mahdotonta siirtyä kylmemmästä kappaleesta lämpimämpään kappaleeseen, jos systeemiin ei tehdä työtä (Young & Freedman 2011, 662). Käytännössä tämä tarkoittaa, että luonnollisia jääkaappeja ei ole olemassa, vaan ne tarvitsevat toimiakseen energiaa. Nämä määritelmät ovat keskenään ekvivalentteja, ja toinen voidaan johtaa kohtalaisen helposti toisesta. Lisäksi toinen pääsääntö klassisessa mielessä on *kokemukseen perustuva postulaatti*, eikä se siis ole seurausta muista luonnonlaeista. (Lampinen 2010, 89.)

Systeemin entropian ( $S$ ) muutos ( $dS$ ) jossakin isotermisessä<sup>36</sup> prosessissa määritellään klassisessa termodynamiikassa olevan  $dS = \frac{dQ}{T}$ , jossa  $dQ$  on systeemin lämpömäärän muutos ja  $T$  lämpötila, jossa systeemi on, kun lämpö siihen tulee. Jos prosessissa lämmitetään esimerkiksi jotakin kaasua, niin sen on laajennuttava, jotta sen lämpötila pysyisi samana (siis jotta prosessi olisi isoterminen). Nyt kaasun molekyyleillä on enemmän tilaa liikkua, joten niiden paikat ovat sattumanvaraisempia. Tässä prosessissa entropia kasvaa (koska  $dQ$  oli positiivinen), ja samalla huomataan, että myös systeemin epäjärjestys kasvaa, koska molekyyliden paikat ovat sattumanvaraisempia. Entropian voidaan siis ymmärtää tarkoittavan klassisessa termodynamiikassa epäjärjestyksen määrää systeemissä, eli se on systeemin epäjärjestystä kuvaava suure. Entropian käsite voidaan laajentaa koskemaan myös prosesseja, jotka eivät ole isotermisiä. Tällöin prosessia kuvataan äärettömällä määrällä infinitesimaaleja askelia, jolloin entropian muutos  $\Delta S = S_B - S_A = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{Q_i}{T_i} = \int_A^B \frac{dQ}{T}$ . (Young & Freedman 2011, 669–670.) Nyt siis kiertoprosessin entropian muutos on  $\Delta S = \oint_A \frac{dQ}{T}$ .

Mitä suurempi systeemin entropia on, niin sitä suurempi on sen epäjärjestys. Systeemin entropian kasvulla tarkoitetaan termodynamiikassa usein systeemin lämpötilojen tasaantumista (lämpöenergian jakaantuminen tasaisemmin) tai kaasujen sekoittumista keskenään systeemissä (kaasulajit sekoit-

<sup>36</sup> Isoterminen prosessi on sellainen prosessi, jossa systeemin lämpötila pysyy samana koko prosessin ajan.

tuvat toisiinsa, eli epäjärjestys kasvaa). Arkipäiväistä epäjärjestyksen lisääntymistä on vaikkapa kahvin ja maidon sekoittuminen kahvikupissa. Tässä kahvi ja maito ovat aluksi erillään, mutta ajan kuluessa ne sekoittuvat keskenään, eli kahvin ja maidon välinen järjestys pienenee, ja systeemin (kahvikuppi) entropia kasvaa.

Nyt voidaan osoittaa, että jos oletetaan termodynamiikan toisen pääsäännön pitävän paikkansa, niin seurauksena on, että entropia ei voi vähentyä kiertoprosessin läpikäyvässä *suljetussa systeemissä*<sup>37</sup> ajan kuluessa. Jos kiertoprosessi on reversiibeli (käännettävissä), niin entropia pysyy ennallaan, mutta jos kiertoprosessi on irreversiibeli (ei-käännettävissä), niin entropia kasvaa. (Ks. esim. Lampinen 2010, 102–103; Young & Freedman 2011, 672–674.) Itse asiassa lähestulkoon kaikki luonnolliset termodynaamiset prosessit ovat irreversiibeileitä (ainakin *de facto* mielessä), joten niissä entropia aina kasvaa. Termodynamiikan toisesta pääsäännöstä siis johtuu, että edellisessä esimerkissä kahvi ja maito sekoittuvat toisiinsa, eivätkä ne koskaan erotu toisistaan kahvikupissa. Toinen esimerkki entropian vähenemisen mahdottomuudesta voidaan ottaa hengitysilma. Ilmassa on vain noin 21 prosenttia happea, mutta happimolekyylit ovat termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan jakaantuneet tasaisesti ilmaan – eli ne ovat epäjärjestyksessä. Jos entropia vähentyisi, niin happimolekyylien ja muiden molekyylien (erityisesti typpimolekyylien, joita ilmasta on noin 78 prosenttia) välinen järjestys kasvaisi, eli happimolekyylit erottuisivat muista molekyyleistä yhdeksi ryhmäkseen. Ne siis voisivat kerääntyä yhteen kasaan esimerkiksi johonkin huoneen nurkkaan, jolloin elämä ei olisi mahdollista muualla huoneessa (tai edes huoneen nurkassa, koska pelkkä happi on ihmiselle vaarallista).

### 5.1.2 Statistinen termodynamiikka

Statistisessa termodynamiikassa tutkimuksen kohteena ovat mikroprosessit, jotka toimivat prosessin havaittavien ilmiöiden taustalla. Ludwig Boltzmann esitti ensimmäisenä teorian siitä, miten entropia tulee määritellä mikroprosessien avulla – ilman lämpö määrän tai lämpötilan käsitteitä – ja miten entropian kasvu voidaan selittää vedoten vain mikroprosesseihin. Tämä on filosofiselta kannalta merkittävää, sillä se antaa tavan käsitellä termodynamiikan toista pääsääntöä siten, että ei ole

<sup>37</sup> Systeemillä tarkoitetaan termodynamiikassa mitä tahansa maailman aluetta, joka muodostaa (ainakin periaatteessa) itsenäisen ja rajatun osan maailmasta. Esimerkiksi kahvikuppi, jossa on kahvia ja maitoa, kerrostalon huoneisto, maapallo tai galaksi voidaan nähdä yhtenä systeeminä. Systeemi on suljettu, kun se ei vaihda energiaa ympäristönsä kanssa. Tällöin systeemi siis on eristetty, ja todella muodostaa oman pienen maailmansa.

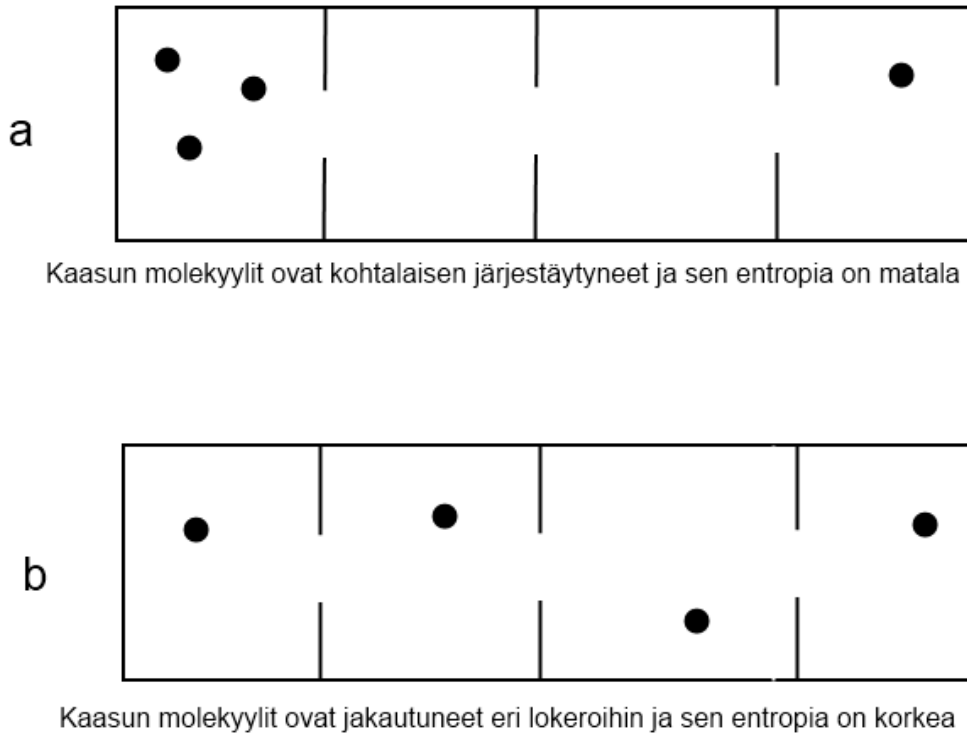


tarpeen käyttää Kelvinin tai Clausiuksen vain empiirisesti perusteltuja muotoiluja. Mikroprosessit, eli hiukkasten liikkeet, kuitenkin noudattavat klassisen mekaniikan lakeja, ja edellä on esitetty, että nämä lait ovat ajallisesti käännettäviä. Mikroprosessit ovat siis ajallisesti käännettäviä prosesseja, joten kaikkien kiertoprosessien tulisi olla reversiibeileitä. Miten Boltzmannin onnistuu selittää se, että luonnollisissa prosesseissa entropia kasvaa, vaikka ne koostuvat pohjimmiltaan reversiibeleistä mikroprosesseista?

Koska mikroprosessit ovat reversiibeileitä ja koska kaikki hiukkaset (vaikkapa jossakin kaasusysteemissä) ovat yhdenvertaisia, niin kaikki mikrotilat<sup>38</sup> ovat keskenään yhtä todennäköisiä. Toisin sanoen mielivaltaisella ajanhetkellä mielivaltaisen hiukkasen kaikki mahdolliset sijainnit ovat yhtä todennäköisiä. Nyt on kuitenkin niin, että mikrotiloja, jotka muodostavat korkean entropian makrotilan<sup>39</sup>, on huomattavasti enemmän kuin mikrotiloja, jotka muodostavat matalan entropian makrotilan (Goldstein 2001, 42). Tämä ajatus voidaan sisäistää esimerkiksi seuraavan kuvan (kuva 5.1) avulla. Tässä kuvataan kaasua, joka koostuu vain neljästä molekyylistä, ja on säiliössä, joka on vastaavasti jaettu neljään lokeroon. Kuvan a-kohdassa kaasun molekyyleistä kolme on ensimmäisessä lokerossa ja yksi viimeisessä. Tällöin kaasun entropia on matala, sillä sen molekyylit ovat kohtalaisen hyvin järjestäytyneet tietylle alueelle säiliössä. Kuvan b-kohdassa taas kaikki molekyylit ovat eri lokeroissa, ja siis ovat hyvin epäjärjestyneessä tilassa. Tällöin kaasun entropia on maksimiarvoonsa, ja se on saavuttanut *tasapainotilan* (equilibrium). Nyt tapoja, joilla kaasun molekyylit voidaan järjestää a-kohdan mukaisesti, on 4, mutta tapoja, joilla neljä molekyyliä voidaan järjestää b-kohdan mukaisesti, on 24. Tästä nähdään, että mikrotiloja (tässä siis järjestystapoja) on huomattavasti enemmän korkean entropian tilalle kuin matalan entropian tilalle.

<sup>38</sup> Mikrotilalla tarkoitetaan systeemin osien (esimerkiksi kaasun yksittäisten molekyylien) kokonaistilaa tarkasteltuna siten, että yksittäisten osien identiteetillä on väliä. Esimerkiksi kaasun tapauksessa yksi mikrotila kertoo tarkalleen, missä tilassa (paikka ja liikemäärä) kukin yksittäinen molekyyli on. Jos siis nimeäisimme kunkin molekyylin, niin mikrotila kertoisi, missä tilassa mikäkin molekyyli milloinkin on. Mikrotilaa voi tarvittaessa verrata makrotilaan.

<sup>39</sup> Makrotilalla tarkoitetaan systeemin osien muodostamaa kokonaistilaa tarkasteltuna siten, että osien identiteetillä ei ole väliä. Esimerkiksi kaasun tapauksessa yhtä makrotilaa voi vastata monta mikrotilaa, sillä kaasun molekyylit ovat täsmälleen samanlaisia toistensa kanssa. Makrotila ei siis muutu, jos vaihdamme kahden nimetyn molekyylin paikkoja keskenään, vaikka mikrotila tällöin muuttuukin. Yksi makrotila vastaa aina yhtä entropian arvoa systeemissä.



**Kuva 5.1 (Kaasun molekyylit matalan ja korkean entropian tiloissa)**

Tämän huomion innoittamana Boltzmann määrittelee mikrotilan  $X$  entropian  $S$  seuraavasti:  $S(X) = k \times \log|\Gamma(X)|$ , jossa  $k$  on Boltzmannin vakio ja  $|\Gamma(X)|$  kuvaa niiden mikrotilojen lukumäärää, jotka muodostavat saman makrotilan kuin mikrotila  $X$  (merkitään siis tätä makrotilaa  $\Gamma(X)$ ) (Goldstein 2001, 42–43). Systeemin kulloisenkin tilan entropia on siis suoraan verrannollinen tämän tilan todennäköisyyteen. Koska epätodennäköisissä tiloissa olevat systeemit pyrkivät todennäköisempiin tiloihin, niin myös entropia pyrkii kasvamaan systeemin läpikäymissä prosesseissa. Tämä huomio muodostaa *statistisen version termodynamiikan toisesta pääsäännöstä*. Tämä versio kohtaa omat ongelmansa, joita tarkastellaan myöhemmin, mutta se myös selittää, millä tavalla toinen pääsääntö voidaan palauttaa klassisen mekaniikan käännettäviin lakeihin. Tärkeää on kuitenkin huomata, että tässä versiossa termodynamiikan toinen pääsääntö on vain *todennäköisyyslaki*, eikä perinteisten mekaanisten lakien kaltaisesti ehdoton. Statistisen termodynamiikan mukaan on siis vain hyvin todennäköistä, mutta ei välttämätöntä, että entropia kasvaa ajan kuluessa.

## 5.2 Termodynaamiset ajan suunnan teoriat

Millä tavalla sitten termodynamiikkaa voidaan käyttää ajan suunnan määrittämiseen? Termodynaamiset ajan suunnan teoriat ehdottavat, että termodynamiikan toinen pääsääntö on ajankäännös-epäinvariantti laki, ja tämän vuoksi sen avulla voidaan määritellä tulevaisuuden suunta ajassa. Seuraavaksi tarkastellaan niin klassisia kuin statistisiakin muotoiluja termodynaamisesta ajan suunnasta. Lisäksi nostetaan esille näiden ongelmia, joihin yritetään myöhemmissä luvuissa antaa vastauksia.

### 5.2.1 Termodynaaminen ajan suunta

Termodynaamiset ajan suunnan teoriat määrittelevät ajan suunnan<sup>40</sup> (eli tulevaisuuden suunnan) termodynaamisten ilmiöiden avulla. Arthur Eddington oli ensimmäisiä, jotka esittivät ajan suunnan olevan termodynaamisesti määriteltävissä. Hän esitteli ajan nuolen käsitteen, jolla hän ymmärtää sitä, että ajalla on tietty nuoli, joka osoittaa sen, kumpaan suuntaan tulevaisuus kulkee. Eddington (1928, 69) esittää, että ajan nuolella on seuraavat kolme ominaisuutta: 1) Tietoisuus tunnistaa sen elävästi. 2) Se seuraa myös järjestyksestä, joka sanoo, että tämän nuolen kääntäminen tekisi ulkomailmasta järjettömän. 3) Se ei esiinny fysikaalisessa tieteessä muuten kuin monen individuaalin muodostaman kompleksin organisaatiossa, jossa se osoittaa epäjärjestyksen lisääntymisen suuntaan. Eddington mukaan kaikki muut luonnonlait, paitsi termodynamiikan toinen pääsääntö, ovat neutraaleja ajan suunnan suhteen (katso esimerkiksi luvut 3.1 ja 3.2). Täten ajan nuoli osoittaa hänen mukaansa siihen suuntaan, johon entropia kasvaa. Entropian kasvun suunta määrittää siis tulevaisuuden suunnan. (Eddington 1928, 66.) Eddingtonin mukaan siis vain entropian avulla voidaan määrittää ajan nuolen suunta. Hänen nähdään niin ikään oletettavan, että termodynaaminen ajan nuoli on samansuuntainen kuin psykologinen (ajan nuolen ensimmäinen ominaisuus) ja rationaalinen (ajan nuolen toinen ominaisuus) ajan nuoli.

Lisäksi Eddington (1928, 75) erottelee toisistaan *primaarit* ja *sekundaarit* lait. Primaarit lait ovat lakeja, jotka kieltävät joitakin ilmiöitä tapahtumasta, koska ne ovat mahdottomia ja sekundaarit lait taas kieltävät tietyt ilmiöt, koska ne ovat liian epätodennäköisiä. Termodynamiikan toinen pääsääntö on sekundaari laki, eivätkä sekundaarit lait ole johdettavissa primaareista laeista (Eddington

---

<sup>40</sup> Tässä (ja jatkossa) ajan suunnalla ymmärretään tulevaisuuden suuntaa eikä ajan suunnistuvuuteen liittyvää ajan suuntaa.

1928, 77). Eddington siis tunnustaa statistisen mekaniikan tuloksen, jonka mukaan toinen pääsääntö on vain todennäköisyyslaki, ja on siis vain todennäköistä, että entropia kasvaa ajan kuluessa. Toisaalta hän taas kieltää sekundaarien lakien johtamisen primaareista, sillä silloin Eddingtonin mukaan myös sekundaarit lait olisivat ajallisesti käännettävissä. Itse asiassa myös todennäköisyyslait (eli sekundaarit lait) ovat tosiasiasa käännettävissä, vaikka Eddington ei tätä ehkä huomionnutkaan, ja tähän käännettävyyteen perustuu myöhemmin käsiteltävä *käännettävyysvastaväite*.

Mitä Eddingtonin mallissa tapahtuu, kun systeemi saavuttaa *termodynaamisen tasapainotilan*? Tasapainotilassa vallitsee täydellinen epäjärjestys, ja entropia ei voi enää kasvaa. Eddington toteaa, että tällöin ajan nuoli katoaa, sillä ei ole olemassa mitään toista keinoa – entropian lisäksi – määrittää ajan suuntaa. Jossain vaiheessa tulevaisuutta koko maailmankaikkeuden entropia saavuttaa maksimiarvonsa, ja tällöin aika ei enää termodynaamisen ajan suunnan teorian mukaan kulje mihinkään suuntaan. Lisäksi jossakin vaiheessa menneisyyttä maailmankaikkeuden energia oli täysin järjestäytynyt, jolloin entropia on ollut minimiarvossaan. (Eddington 1928, 78–79 ja 83–84.) Näissä tilanteissa perinteinen termodynaaminen malli joutuu ongelmiin, sillä sen on sanottava, että ajan nuoli hukkuu tasapainotilassa ja että ajalla ei ole ollut suuntaa ennen entropian minimiarvon hetkeä. Nämä ajatukset sopivat tietysti yhteen tiettyjen fysiikan mahdollisten mallien kanssa. Esimerkiksi alkuräjähdysteoria sanoo, että aikaa ennen alkuräjähdyttä ei ole ollut, ja jotkin suhteellisuusteorian kanssa yhteensopivat kosmologiset mallit esittävät, että universumi laajenee ikuisesti, jolloin entropiakin voisi kasvaa ikuisesti.

### 5.2.2 Klassisen termodynaamisen ajan suunnan kritiikki

Termodynaaminen ajan suunnan teoria on tietenkin saanut osakseen myös kritiikkiä. Muun muassa Percy Williams Bridgman on nostanut esiin Eddingtonin näkökulman heikkouksia. Bridgman kysyy, millä tavoin konkreettisessa tilanteessa tulisi toimia, jotta voitaisiin sanoa, kulkeeko aika eteenpäin vai taaksepäin. Jos maailmankaikkeuden entropian havaitaan vähenevän, niin sanottaisiinko silloin, että aika kulkee taaksepäin, vai että entropia vähenee ajan kuluessa? (Bridgman 1950, 165.) Jotta ajan ja entropian suhteesta siis voitaisiin sanoa mitään, niin on jo valmiiksi oletettava, että aika kulkee havainnoissa eteenpäin. Näin Eddington ei oikeastaan tulekaan määritelleeksi ajan suuntaa entropian kasvun perusteella. Tarkkaan ottaen tuloksena on vain, että entropia kasvaa tulevaisuuden suuntaan, jos oletetaan, että aika kulkee tällä hetkellä eteenpäin. Voisi aivan hyvin olla myös niin, että aika itse asiassa kulkee tällä hetkellä taaksepäin ja että entropia vähenee ajan varsi-

naiseen kasvusuuntaan (erotettuna havaitusta psykologisesta ajan suunnasta). Bridgman esittääkin, että aika tulee ymmärtää primitiivisenä – eikä jonakin analysoitavana – seikkana. Hänen mukaansa havaitsijan oletetaan tietävän ajan suunta (eli kumpi kahdesta tapahtumasta on toista myöhempi) jo silloin, kun hän antaa merkityksen fysikaalisissa laeissa esiintyville suureille. Erityisesti termodynamiikan tapauksessa systeemin lämpötilaa ei voida mitata, jollei tiedetä, että lämpömittarin lukema on asettunut paikalleen. Tämä lämpötilan asettuminen tarkoittaa, että lukema ei enää muutu *myöhemmänä* ajan hetkenä. Toisin sanoen Bridgmanin mukaan klassisessa termodynamiikan toisen pääsäännön muotoilussa ajan suunta oletetaan tiedetyksi, joten sitä ei voida käyttää ajan suunnan määrittelyyn. (Bridgman 1950, 167.)

Statistinen termodynamiikka ei kuitenkaan oleta tiedetyksi systeemin lämpötilan paikallaan pysyvyyttä tai muutakaan ajan suunnasta riippuvaa suuretta. Lisäksi Bridgmanin kritiikkiin voidaan vastata tuomalla käsittelyyn – ajan suunnan sijasta – ajan anisotropia. Grünbaum (1963, 224) huomauttaa, että Bridgman samaistaa toisiinsa ajan kulkusuunnan ja ajan anisotropian. Jos löydetään ei-käännettävissä oleva prosessi, niin se kertoo, että aika on anisotropinen eli, että sen suunta on sisäisesti määritettävissä. Ei-käännettävä prosessi ei kuitenkaan kerro sitä, kumpi suunnista on tulevaisuuden suunta. Nyt entropian kasvu on tällainen ei-käännettävissä oleva prosessi, ja voidaan tehdä määritelmä, joka sanoo, että entropian kasvusuunta on myös ajan nuolen suunta (Grünbaum 1963, 226).

Grünbaum vastaa myös Bridgmanin toiseen kritiikin kohteeseen, eli siihen, miten lämpötilaa voidaan mitata olettamatta ajan suuntaa tiedetyksi. Vastauksessaan Grünbaum vetoaa aiemmin esiteltyyn kausaaliseen ajanteoriaan, ja siinä määritettyyn ajallisen välissä-relaation käsitteeseen. Grünbaumin mukaan sen avulla voidaan tietää, että lämpömittarin lukema on asettunut paikalleen ilman, että ajan suunnasta oletetaan mitään. Jos lämpömittarin lukeman havaitaan pysyvän samana koko tietyn aikavälin, niin voidaan päätellä, että lukema on asettunut paikalleen tämän aikavälin kahden päätepisteen välissä olevina ajanhetkinä. Kausaalista ajanteoriaa käsittelevässä osiossa huomattiin Grünbaumin määrittelevän välissä-relaation vetoamatta myöhempi kuin -relaatioon, joten tässä ei tulla olettaneeksi ajan suuntaa tiedetyksi, niin kuin Bridgman esittää. (Grünbaum 1963, 231.)

### 5.2.3 Statistisen termodynamiikan ongelmat

Kritiikkiä on esitetty myös statistiseen termodynamiikan versioon liittyen. Bridgman (1950, 169–170) esittää, että on väärin olettaa, että statistisen mallin elementit ovat toisistaan itsenäisiä. Esimerkiksi kaasujen molekyylit toimivat suhteessa toisiinsa, ja molekyylit vaikuttavat toisiinsa. Eri-laiset mikrotilat eivät siis välttämättä olekaan yhtä todennäköisiä. Tällöin ei voitaisi sanoa, että molekyyliin makrotilan todennäköisyys saataisiin jakamalla tämän makrotilan tuottavien mikrotilojen lukumäärä kaikkien mahdollisten mikrotilojen lukumäärällä. Yleinen vastaus Bridgmanin esittämään huomioon on ollut, että havainnot systeemistä täytyy tehdä tarpeeksi pitkän aikavälin päässä toisistaan. Tällöin edellisen havainnon aikana vallinnut mikrotila ei enää vaikuta uutta havaintoa tehtäessä.

Kritiikissään Bridgman vetoaa vielä siihen seikkaan, että epätodennäköisen (eli järjestäytyneen) makrotilan jäljet vaikuttavat pidempään kuin todennäköisen (epäjärjestyksessä olevan) makrotilan jäljet. Tämän vuoksi havaintoväliä tulisi kasvattaa entistä suuremmaksi, jotta voitaisiin olla varmoja, että myös järjestyneen tilan jäljet ovat ehtineet hävitä. Tämän lisäksi statistisessa termodynamiikassa oletetaan tiedetyksi molekyyliin identiteetti. Molekyylit pitäisi siis pystyä erottamaan toisistaan, jotta eri mikrotilojen määrä voitaisiin laskea ja jotta saman makrotilan muodostamat mikrotilat voitaisiin erottaa toisistaan. Havaintoja tulisi kuitenkin tehdä paljon useammin, kuin edellä on oletettu, jotta individuaaleja molekyylejä pystyttäisiin seuraamaan. Lisäksi havaintojen tekeminen saattaa vaikuttaa systeemin toimintaan ja mikrotilaan varsin arvaamattomasti. Koska todennäköisyyslaskennassa tilan todennäköisyys määritellään sen ilmenemisen frekvenssiksi, niin edellä esitetyn perusteella tätä todennäköisyyttä on vaikeaa mieltää samaksi asiaksi, kuin Boltzmannin teorian avulla laskettua todennäköisyyttä. (Bridgman 1950, 171–172.)

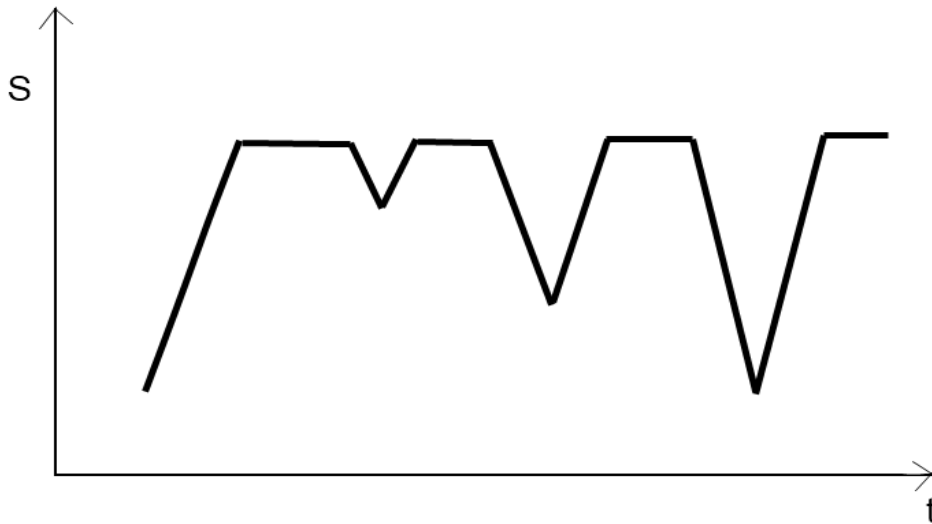
Tärkein – ja filosofeille eniten päänvaivaa tuottanut – ongelma statistis-termodynaamisessa ajan suunnan määritelmässä on kuitenkin ollut niin kutsuttu *käännettävyyssvastaväite* (reversibility objection).<sup>41</sup> Tämän vastaväitteen idea on, että vaikka mikrotiloja, jotka muodostavat todennäköisen makrotilan, on huomattavasti enemmän kuin mikrotiloja, jotka muodostavat epätodennäköisen makrotilan, niin kehityskaaria on todennäköiseen ja epätodennäköiseen tilaan aina yhtä monta (Hurley

---

<sup>41</sup> Tämä vastaväite tunnetaan myös nimellä Loschmidtin paradoksi, sen ensimmäisenä esittäneen Johann Loschmidtin mukaan.

2004, 319). Tämä johtuu siitä, että vaikka makroprosessien ei pitäisi olla käännettäviä ajassa, niin mikroprosessit, joista ne koostuvat, kuitenkin ovat. Tästä seuraa, että jokaista mikrotilaa, joka kehittyy korkeamman entropian tilaa kohti, vastaa toinen mikrotila (käännetään molekyylisen suunnan), joka kehittyy matalampaa entropiaa kohti. Tällöin entropian kasvun ei tulisi olla yhtään todennäköisempää kuin sen laskunkaan. (Jill North 2011, 15.) Prosesseja, joissa entropia vähenee, tapahtuu siis yhtä usein kuin prosesseja, joissa entropia kasvaa. Mielivaltaisesta ajankohdasta ei siis voida sanoa, että se on hyvin suurella todennäköisyydellä kehittynyt matalan entropian tilasta, ja on matkalla korkean entropian tilaan, sillä samalla todennäköisyydellä se onkin kehittynyt korkean entropian tilasta, ja on matkalla matalan entropian tilaan.

Käännettävyyssvastaväitteestä seuraa, että suljetun systeemin entropiakäyrästä tulee kuvan 5.2 kaltaisen (Grünbaum 1963, 242). Tästä kuvasta nähdään, että mielivaltaisessa ajankohdassa on yhtä todennäköistä, että entropia kasvaakin menneisyyden suuntaan, kuin että se kasvaisi tulevaisuuden suuntaan. Tästä seuraa, että aivan yhtä suurella todennäköisyydellä, kuin tämän hetken tila kehittyy korkeamman entropian tilaa kohti, niin se kehittyi myös menneisyydessä korkeamman entropian tilasta (Grünbaum 1963, 243). Tässä on hyvä huomata, että koska entropia määriteltiin logaritmi-funktion ( $S(X) = k \times \log|\Gamma(X)|$ ) avulla, niin matalan entropian tilat ovat *eksponentiaalisesti* epätodennäköisempiä kuin korkeamman entropian tilat. Tästä johtuu, että jos entropiakäyrältä valitaan mielivaltainen matalan entropian tila, niin on paljon todennäköisempää, että se sijaitsee käyrän kuilun pohjalla, kuin että se sijaitsee varsinaisessa mäessä. Entropiakäyrällä on siis hyvin paljon matalia kuiluja ja hyvin vähän syviä kuiluja. Tästä huomiosta johtuen voidaan sanoa, että mielivaltainen matalan entropian tila kehittyy suurella todennäköisyydellä tulevaisuudessa korkeamman entropian tilaa kohti. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kyseessä oleva tila olisi kehittynyt menneisyydessä matalamman entropian tilasta, vaan myös hyvin suurella todennäköisyydellä se kehittyi menneisyydessäkin korkean entropian tilasta, ja sijaitsee siis entropiakäyrän kuilun pohjalla.



**Kuva 5.2 (Suljetun systeemin entropiakäyrä)**

Kosmologisten havaintojen mukaan menneisyydessä kuitenkin vaikutti vallitsevan matalamman entropian tila, eikä käännettävyysvastaväitteen postuloima korkea entropia. Nyt todennäköisyys, että nämä havainnot entropian mataluudesta menneisyydessä todella vastaavat todellisuutta, on hyvin alhainen. Tämä todennäköisyys on jopa huomattavasti alhaisempi kuin todennäköisyys, että muistikuvamme ja havaintomme ovat harhoja ja seurausta vain ihmisten aivojen toiminnallisista häiriöistä (Price 2004, 226–227). On paljon todennäköisempää, että kaikkien ihmisten aivot tuottavat symmetrisesti vääriä havaintoja, kuin että koko universumi olisi ollut tällaisessa äärimmäisen epätodennäköisessä matalan entropian tilassa. Käännettävyysvastaväitteen kautta huomataan, miten ongelmallista ajan suunnan määrittely entropian kasvun avulla on. Miten entropian kasvun suunta voidaan määritellä tulevaisuuden suunnaksi, kun on täsmälleen yhtä todennäköistä, että entropia kasvaa myös menneisyyden suuntaan?

Tässä tulee erottaa toisistaan päättely ajan suunnasta entropian kasvuun ja toisaalta päättely entropian kasvusta ajan suuntaan. Jos siis hetken A entropia on matala, niin silloin todellakin on todennäköisempää, että myöhempanä ajanhetkenä B systeemin entropia on suurempi kuin hetkellä A. Tämä johtuu siitä, että systeemit viettävät enemmän aikaa korkean entropian tiloissa kuin matalan entropian tiloissa. Tässä on kuitenkin kyseessä päättely ajan suunnasta entropian kasvuun, eikä se sano tarkalleen haluamaamme – eli sitä, että entropian kasvun suunta on ajan suunta. (Reichenbach 1999, 114–115.) Edellä huomattiin, että juuri tähän samaan tulokseen Eddington joutuu Bridgmanin mu-



kaan tyytymään. Käännettävyyssvastaväitteeseen ei ole siis vielä vastattu tyydyttävästi, mutta seuraavassa luvussa tarkastellaan erilaisia reunaehtoja, joiden avulla tähän ongelmaan voidaan vastata.

## 6 TERMODYNAAMISTEN TEORIOIDEN MONET KASVOT

Craig Callender (2001) esittää, että käännettävyyssvastaväitteeseen voidaan yrittää antaa vastausta kahdella tavalla: Joko voidaan olettaa ajallisesti ei-käännettäviä reunaehtoja, tai sitten teoriaan voidaan lisätä ei-käännettäviä lakeja, jotka tekevät entropian kasvusta todennäköisempää. Tällaisia ei-käännettäviä lakeja on esitetty ilmenevän muun muassa elektromagnetismissa, kosmologiassa, kvanttikosmologiassa, interventionismissa (systeemin ulkopuolelta tulevissa häiriöissä) ja kvanttimekaniikassa. Callender (2010, 34) kuitenkin toteaa, että mikään edellä mainituista ratkaisuista ei ole riittävä vastaus selittääkseen termodynaamista ajan suuntaa, sillä sitä ei voida johtaa tällaisista perustavista laeista. Ne eivät siis selitä havaintojamme matalasta entropian alkutilasta ja entropian jatkuvasta kasvusta. Lisäksi myöhemmin luvussa seitsemän esitetään, että termodynaamiset prosessit ovat hyvin pitkälti vastuussa intuitiivisesti koetusta ajan suunnasta, joten näiden ei-käännettävien lakien ei voida nähdä selittävän tätä intuitiivista ajan suuntaa, elleivät ne selitä termodynaamista ajan suuntaa. Tästä syystä termodynaamisen nuolen määrittämiseksi on tärkeää ja sen määrittämiseksi tarvitaankin juuri ei-käännettäviä reunaehtoja. Tällaisiksi lupaaviksi reunaehdoiksi on esitetty muun muassa menneisyshypoteesia ja haarasysteemihypoteesia.

### 6.1 Menneisyshypoteesi

*Menneisyshypoteesi* (past hypothesis) on hypoteesi, joka esittää, että universumin ensimmäinen tila oli matalan entropian tila. Menneisyshypoteesi liittyy termodynaamisen ajan suunnan teoriaan, joka sanoo, että ajan suunnalla ja entropian kasvusuunnalla on yhteys toisiinsa ja että tulevaisuuden suunta on se suunta, johon mentäessä systeemin (kuten universumin) entropia kasvaa. Menneisyshypoteesilla on seurauksia erityisesti statistisen termodynamiikan määrittämälle ajan suunnalle, sillä siinä entropia ei välttämättä kasva monotonisesti universumissa, ja siten myöskään ajan suunta ei ole yksiselitteinen.

#### 6.1.1 Menneisyshypoteesi ja sen motiivi

Menneisyshypoteesilla tarkoitetaan ajatusta, että meidän universumimme alkutila oli matalan entropian tila. Statistisen termodynamiikan viitekehyksessä menneisyshypoteesi siis sanoo, että universumi syntyi epätodennäköiseen tilaan. Menneisyshypoteesin versioita on useita, mutta esimerkiksi sen ensimmäisenä esitellyt David Albert (2000, 96) määrittelee sen seuraavasti:

The Past-Hypothesis (which is that the world first came into being in whatever particular low-entropy highly condensed big-bang sort of macrocondition it is that the normal inferential procedures of cosmology will eventually present to us).

Albertin käyttämä menneisyshypoteesi-termi on jäänyt yleiseen käyttöön filosofien ja fyysikoiden keskuudessa, vaikka hän ei ollutkaan ensimmäinen, joka esitti vastaavia ajatuksia entropisten systeemien – ja universumin – alkutilasta. Esimerkiksi statistisen termodynamiikan isä, Ludwig Boltzmann, (1897, 1) esitti seuraavan hypoteesin:

The second law will be explained mechanically by means of assumption A (which is of course unprovable) that the universe, considered as a mechanical system – or at least a very large part of it which surrounds us – started from a very improbable state, and is still in an improbable state.

Boltzmannin version voidaan huomata olevan huomattavasti lievempi, sillä hän olettaa vain meitä ympäröivän osan universumista olleen menneisyydessä matalassa entropiassa. Hänelle siis koko universumin entropia saattaa olla tasapainotilassa (eli hyvin korkea), mutta universumin osissa voi tapahtua entropian heilahteluja (fluctuations). Nämä heilahtelut selittävät menneisyydessä tietyllä alueella vallinneen matalan entropian.

Muun muassa Richard Feynman (1965, 116) ei usko maailmamme voineen syntyä entropian heilahteluista, vaan hän nostaa menneisyshypoteesin fysikaalisen lain asemaan:

The success of all those sciences indicates that the world did not come from a fluctuation, but came from a condition which was more separated, more organized, in the past than at the present time. Therefore I think it necessary to add to the physical laws the hypothesis that in the past the universe was more ordered, in the technical sense, than it is today – I think this is the additional statement that is needed to make sense, and to make an understanding of the irreversibility.

Sitä, millaiseen asemaan (fysikaalinen laki, todistettavissa oleva hypoteesi vai selittämätön ensimmäinen syy) menneisyshypoteesi tulisi asettaa, käsitellään enemmän myöhemmin tässä luvussa.

Vaikka menneisyshypoteesilla tarkoitetaan nykykeskustelussa juuri Albertin esittämää ajatusta, niin mielestäni on mielekästä käsitellä myös muita teorioita, joiden voidaan nähdä hyödyntävän samaa ideaa. Albertin versio menneisyshypoteesista on näistä selkeästi vahvin väitteeltään, ja samasta syystä se on myös niistä selitysoimaisin. Vahvuutensa vuoksi juuri tämä versio tuntuu kuitenkin olevan myös kritisoiduin menneisyshypoteesin versioista. Saman idean voidaan nähdä toistuvan myös Boltzmannin esityksessä, ja myös sitä on kritisoitu varsinkin varhaisemmassa keskustelussa.

Menneisyshypoteesin motiivina on vastata aiemmin esitettyyn *käännettävyys-vastaväitteeseen*. Menneisyshypoteesi vaikuttaa siten, että menneisyyden suuntaan mentäessä entropia ei voi kasvaa, koska oletetaan, että menneisydessä vallitsee matala entropia. Täten menneisyshypoteesin versiosta riippuen sitoudutaan joko siihen, että tällä hetkellä ollaan entropiakäyrän nousevassa alkumäessä (Albertin versio) tai siihen, että ollaan jollakin sen monen kuilun ylämäistä (Boltzmannin versio). Menneisyshypoteesia tarvitaan siis kahdesta syystä: ensiksikin siksi, että universumin ajan suunta halutaan määritellä entropian avulla, ja toiseksi siksi, että havainnoille systeemien entropian kasvusta ja niiden matalan entropian menneisyydestä halutaan jokin järkevä selitys. Menneisyshypoteesi siirtää ajan suunnan ongelman vain yhteen hetkeen ajassa. Jos menneisyshypoteesi on reunaehtona uskottava, niin se selittää, miksi entropian havaitaan kasvavan, ja miksi satumme elämään niin epätodennäköisellä, suhteellisen matalan entropian, aikakaudella. (Price 2004, 228.) Onko menneisyshypoteesi kuitenkin tosi tai uskottava? Miten entropia tulisi ylipäätään määritellä universumin alkutilassa? Syntyikö maailma todella matalan entropian tilaan, ja jos syntyi, niin miksi se tuli olemassa olevaksi niin epätodennäköisissä oloissa? Näitä kysymyksiä – ja niiden vastausyrityksiä – käsitellään seuraavaksi.

Onko menneisyshypoteesin oletus matalan entropian alkutilasta oikeutettu, saati voidaanko sitä kutsua luonnonlaiksi? North (2011, 20–25) esittää lukuisia kysymyksiä, joihin kaivataan vastausta menneisyshypoteesin oikeuttamiseksi: Onko se todistettavissa oleva hypoteesi, vai laki itsessään? Miksi alkuräjähdyksessä oli matala entropia, vaikka se ja sen jälkeiset tilat olivat hyvin yhdenmuukaisia (epäjärjestyneitä)? Miksi maailmankaikkeus alkoi niin epätodennäköisessä tilassa? Miten kokonaissysteemin alkutilan matala entropia selittää alisysteemien entropian kasvun? Muitakin vas-

tustuksia menneisyshypoteesia vastaan on esitetty, ja esimerkiksi John Earman (2006, 400) sanoo tämän hypoteesin olevan ”huonosti motivoitu ja huonosti määritelty, ja sen täytöntöönpano koostuu lähinnä raivoisasta käsien heiluttelusta ja toiveajattelusta. Lyhyesti sanottuna se ei ole edes väärin.” Seuraavaksi syvennyttäänkin menneisyshypoteesia vastaan esitettyihin argumentteihin ja sen puolustuksiin.

### 6.1.2 Omapainovoimaisten systeemien entropia

Nykyisen kosmologian mukaan aikaisen maailmankaikkeuden tilat olivat hyvin homogeenisia tiloja, joissa lämpötilat ja materia olivat hyvin tasaisesti jakautuneita (Wald 2006, 395). Tällaisia homogeenisia tiloja on yleisesti pidetty korkean entropian tiloina, sillä niissä epäjärjestys on suuri. Kuitenkin menneisyshypoteesissa esitetään, että tämä homogeeninen alkutila oli hyvin matalan entropian tila. Miten on mahdollista, että tässä homogeenisessa, epäjärjestyneessä alkutilassa on vallinnut matala entropia? Statistisen termodynamiikan mukaan tilan entropia on alhainen, jos tämä tila on epätodennäköinen. Universumin homogeeninen alkutila todellakin on hyvin epätodennäköinen, ja sen todennäköisyyden on laskettu olevan vain noin  $1:10^{10^{123}}$  (Penrose 1989, 344). Alkutilan epätodennäköisyys johtuu painovoimasta, jonka olisi pitänyt näin lyhyillä välimatkoilla vetää materiaa yhteen klimpeiksi, jolloin materian olisi pitänyt olla jakautunut epätasaisesti. Painovoima toisin sanoen kääntää todennäköisyydet – ja entropian – pääläelleen. Järjestäytyneistä tiloista tulee todennäköisiä ja epäjärjestyksessä olevista tiloista epätodennäköisiä.

Jos universumin alkutilan halutaan osoittaa olevan matalan entropian tila, niin tällöin tulee myös selittää, miten painovoima ja entropia todella suhtautuvat toisiinsa. Muun muassa John Earman hyökkää tätä painovoiman ja entropian yhteensovittamista vastaan. Earman (2006, 418) huomauttaa, että Boltzmannin entropia on tiukasti määritelty suure, ja ei ole olemassa hyvin määriteltyä teoriaa, joka yhdistäisi painovoiman ja entropian toisiinsa. Boltzmannin entropia oli alun perin suunniteltu tiukasti valvotuille suljetuille systeemeille, jotka toimivat muuttumattomassa painovoimakentässä – kuten maapallon pinnalla. Tavoitteena onkin esittää teoria siitä, miten Boltzmannin entropian, eli makrotilan todennäköisyyden, voidaan nähdä kasvavan *omapainovoimaisissa*<sup>42</sup> (self-gravitating) systeemeissä.

<sup>42</sup> Omapainovoimaisella systeemillä tarkoitetaan sellaista systeemiä, jossa kappaleiden välinen painovoima vaikuttaa selkeästi kappaleiden liikkeeseen. Tällaisissa systeemeissä painovoima ymmärretään siis systeemin kappaleiden välisenä voimana, eikä systeemin ulkopuolelta tulevana voimana, joka vaikuttaisi kaikkiin sys-

Callender tuo esille muutamia ongelmia, joita kohdataan omapainovoimaisten systeemien entropian määrittelemisessä: Entropia on perinteisesti määritelty vain suljetuille systeemeille, joihin ulkopuoliset asiat eivät pääse vaikuttamaan. Toki kaikkiin systeemeihin saattaa päästä myös ulkopuolisia vaikutuksia, mutta nämä vaikutukset tapahtuvat vain systeemien reunoilla. Tällöin systeemin ollessa itsessään tarpeeksi suuri, voidaan nämä reunavaikutukset sulkeistaa pois niiden suhteellisen vähäisyyden vuoksi. Painovoiman tapauksessa vaikutus on kuitenkin huomattavaa myös pitkien välimatkojen päästä, joten systeemien eristettävyys ei toimi samaan tapaan kuin perinteisesti. Systeemin ulkopuoliset seikat vaikuttavat siis myös systeemin sisäosissa eivätkä vain sen reunoilla. Tästä ulkopuolisesta vaikutuksesta johtuen systeemin entropia ei pysy additiivisena, eli alisysteemien entropioiden summa ei vastaa koko systeemin entropiaa. Lisäksi termodynaamista tasapainotilaa ei voida määrittää ollenkaan, jos systeemin reunavaikutuksia (eli systeemin reunoilla tapahtuvia vaikutuksia) ei voida sulkeistaa. (Callender 2010, 45–47.)

Earman huomauttaa, että vaikka tulevaisuudessa löydettäisiin koko universumille pätevä entropian määritelmän, niin samalla kohdataan ainakin kolme uutta ongelmaa. Ensiksikin ei ole takuuta siitä, että entropian kasvu universumissa olisi monotonista. (Earman 2006 418.) Tästä johtuen ajaudutaan lähemmäksi esimerkiksi Reichenbachin (1956, 127) esittämää ajatusta, että ajan suunta on määriteltävissä vain jaksoittain siten, että entropiakäyrän nousuissa aika kasvaa, ja sen laskuissa aika vähenee. Aika ei siis olisi yksisuuntainen, vaan se voisi kasvaa ja vähentyä riippuen entropian käyttäytymisestä.

Toiseksi Earman nostaa esille, että jos matalan entropian alkutila on painovoiman seurauksesta itse asiassa homogeeninen, niin silloin kaikkein matalin entropian tila olisi täysin homogeeninen. Tällaisesta täysin homogeenisesta tilasta ei olisi mahdollista kehittyä havaittua järjestäytyneisyyttä, joka tarvitaan elämälle kelvollisiin matalan entropian alisysteemeihin. (Earman 2006, 419.) Toisin sanoen täydellisestä epäjärjestyksestä ei voi Earmanin mukaan syntyä meidän galaksimme kaltaisia alisysteemeitä, joissa vallitsee suhteellisen hyvä järjestys. Myöhemmin käsiteltävät *inflaatioteori-*

---

teemin kappaleisiin samansuuntaisesti ja samalla voimalla. Esimerkiksi galaksit voidaan nähdä omapainovoimaisina systeemeinä, sillä niissä painovoima toimii lähinnä tähtien ja planeettojen välisenä voimana. Toisaalta taas maan pinnalla oleva systeemi ei ole omapainovoimainen, sillä siinä maapallon painovoima vaikuttaa kaikkiin systeemin kappaleisiin samalla tavalla.

*at*<sup>43</sup> universumin synnystä kuitenkin selittävät nämä nykyiset epätasaisuudet universumissa. Näiden teorioiden mukaan *kvanttiheilahtelut* (quantum fluctuations), jotka voidaan nähdä aaltoina, kasvavat universumin eksponentiaalisessa laajenemisessa (inflaatiossa) hyvin suuriksi, jolloin niiden aallonpituus kasvaa eksponentiaalisesti, ja niitä ei voida enää pitää kvanttiheilahteluina. Nämä venytetyt kvanttiheilahtelut saavat aikaan universumin potentiaalista energiaa kuvaavan skalaarikentän arvon vaihtelut eri universumin alueilla. Tästä energian jakautumisen epätasaisuudesta taas seuraa nykyinen epäjärjestyneisyys. Hyvin pienet kvanttiheilahtelut siis saavat inflaation seurauksena aikaan nykyiset galaksit ja tähdet, jotka luovat edellytykset elämälle universumissa. (Linde 2004, 52–53.)

Earmanin kolmas kritiikki kohdistuu siihen, että Boltzmannin entropia on matala alkutilassa painovoiman ansiosta, mutta painovoima on epäolennainen tekijä meitä koskevien alisysteemien entropian kasvun selittämisessä. Ei ole uskottavaa, että painovoiman aiheuttama entropian kasvu universumissa selittäisi havaitut paikalliset prosessit, joissa entropia kasvaa. Alisysteemien entropian kasvua ei siis voida selittää soveltamalla niihin omapainovoimaisten systeemien entropian kasvun selittäviä yhtälöitä. Lisäksi kokonaissysteemin entropian kasvu ei takaa alisysteemien entropian kasvua, koska kyseessä ei ole enää tavallisia suljettuja systeemejä, joiden entropia on additiivinen. Menneisyshypoteesi, sellaisena kuin Albert sen ymmärtää, ei siis selitä havaintoja jokapäiväisten systeemien entropian kasvusta. (Earman 2006, 419–420.) Toisin sanoen Earman kritisoi sitä, että menneisyshypoteesia käytettäessä joudutaan käyttämään kahta eri entropian määritelmää (toista omapainovoimaisille systeemeille sopivaa ja toista normaaleille – jokapäiväisille – termodynaamisille systeemeille sopivaa), jotka eivät välttämättä ole yhteensopivia. Omapainovoimaisten systeemien entropian kasvusta ei suoraan seuraa normaalien systeemien entropian kasvua, eikä toisinpäin.

Entropian määrittelemisen *tasapainotilassa* oleville omapainovoimaisille systeemeille osoittautuu siis hankalaksi. Onneksi universumin alkutila, johon menneisyshypoteesi sijoittuu, ei olekaan tasapainotila, vaan menneisyshypoteesin mukaan mahdollisimman kaukana siitä. Esimerkiksi Callender (2010, 47) esittää, että oikeastaan tarvitaan vain hyvin määritelty makrotila ja hyvin määritelty mahdollisten mikrotilojen joukko, jotta universumin alkutilan entropia voitaisiin määritellä. Tähänkin ajatukseen liittyy kuitenkin ongelmia. Vaikka entropia voitaisiin määritellä universumin alkutilalle, niin tämä ei vielä kerro mitään siitä, miten systeemi kehittyy tästä tilasta eteenpäin. Tä-

---

<sup>43</sup> Inflaatioteorioista lisää luvussa 6.1.4.

mä uusi entropian määritelmä tulisi olla sellainen, että se myös kasvaa ajan kuluessa. Koska tasapainotilaa ei voida määrittää omapainovoimaisille systeemeille, tai edes osoittaa, että tasapainotila vastaa suurinta aluetta vaiheavaruudessa (mikrotilojen joukossa), niin ei voida sanoa, että systeemin entropia pyrkii *tasapainotilaan* ajan kuluessa. (Callender 2010, 48–50.)

Ei ole kuitenkaan poissuljettua, etteikö omapainovoimaisille systeemeille voitaisi määritellä entropiaa, joka kasvaa ajassa. Callender (2010, 54–55) esittääkin, että voidaan löytää yhtälöitä, jotka kuvaavat omapainovoimaisten systeemien kehitystä, ja joissa Boltzmannin entropia (eli tilan todennäköisyys) kasvaa. Samassa hän kuitenkin myöntää, että tunnetut tällaiset yhtälöt pätevät vain tietyille avaruuden osa-alueille, eikä koko universumille. Tällöin menneisyshypoteesi – ja sitä kautta termodynaaminen ajan suunta – voidaan osoittaa todeksi vain joillekin avaruuden alueille. Tämä tulos ei tietenkään ole se, mikä oli menneisyshypoteesin tavoitteena. Tuloksena on tässä tapauksessa enemmänkin Boltzmannin (1964, 447) ehdottama malli, jossa ajan suunta saattaa vaihdella avaruuden eri osa-alueiden välillä.

### 6.1.3 Epätodennäköisen alkutilan selitykset

Sopivaa määritelmää entropialle omapainovoimaisissa systeemeissä ei siis ainakaan vielä ole löydetty, mutta tämä ei tarkoita, etteikö tällaisten systeemien hyvin määritelty entropian kasvu olisi mahdollista. Menneisyshypoteesi kohtaa kuitenkin myös toisen ongelman: jos universumin alkutila on ollut menneisyshypoteesin mukaisesti matalan entropian tila, niin miksi universumi on syntynyt näin äärimmäisen *epätodennäköiseen* tilaan? Paljon todennäköisempää olisi ollut, jos alkuräjähdyksen jälkeinen tila olisi ollut hyvin järjestynyt ja epähomogeeninen. Tässä luvussa esitellään muutamia mahdollisia selityksiä alkutilan alhaiselle entropialle, ja käsitellään myös sitä kysymystä, että tarvitseeko epätodennäköistä alkutilaa selittää lainkaan.

Menneisyshypoteesin totuutta on yritetty todistaa monin tavoin. Esimerkiksi Reichenbach esittää, että koska kausaaliset lait, universumin nykytila ja sen kehityssuunta tunnetaan tarpeeksi hyvin, niin näistä voidaan päätellä, että menneisyydessä entropia on ollut vielä matalampi kuin nyt. Tätä hän kutsuu *deterministiseksi metodiksi* päätellä menneisyyden tilasta jotakin. Havainnot kertovat, että nykytila on suhteellisen matalan entropian tila ja että entropia kasvaa jatkuvasti. Näistä havainnoista ja mekaniikan lakien tuntemuksesta voidaan päätellä myös se, millaisia olivat systeemien menneet



tilat. Näiden tilojen taas voidaan laskea olevan nykyhetkeä matalamman entropian tiloja. (Reichenbach 1956, 129–130.)

Myös deterministisessä metodissa törmätään kuitenkin ongelmiin. Tässä tapauksessa ongelma on se, että matalan entropian alkutila on huomattavasti epätodennäköisempi kuin tilanne, että muisti ja havainnot tuottavat väärää dataa. Tilanne pahenee eksponentiaalisesti, mikäli determinististä metodia venytetään koskemaan aina aikaisempaa menneisyyttä ja matalampaa entropiaa. (Price 2004, 226–227.) Ongelmana ei kuitenkaan näytä olevan se, oliko universumin alkutila homogeeninen tai sen energia jakautunut tasaisesti, sillä tämän puolesta on olemassa runsaasti kosmologista näyttöä, ja sitä pidetään yleisesti totena. Ongelma onkin se, miksi universumi syntyi näin epätodennäköiseen tilaan. Jos tätä ei pystytä selittämään, niin on hyvä syy uskoa, että alkutila onkin todennäköinen ja että jokin muu seikka, jota ei ole otettu huomioon, vaikuttaa alkutilan todennäköisyyteen. Jos taas tällainen tuntematon tekijä (joka tekee alkutilasta todennäköisen) on olemassa, niin silloin alkutilan matala entropia on kyseenalainen. Tämä tuottaa jälleen lisää ongelmia entropian määrittelylle, sillä tällöin *todennäköinen* alkutila olisi jotenkin saatava määritellyksi matala entropian tilaksi.

Reichenbachin lisäksi myös Boltzmann esittää muutamia ajatuksia, jotka voisivat selittää systeemin alkutilan matalaa entropiaa. Hän esittää, että koska universumi on äärettömän suuri, niin siinä voi – ja pitää – sijaita alueita, jotka ovat alkutilassaan olleet hyvin matalan entropian tilassa, ja ovat yhä suhteellisen matalan entropian tilassa. Tämä pätee, vaikka universumi kokonaisuutena olisikin tasapainotilassa entropiansa suhteen. Täten ei ole ollenkaan outoa, että ihmiset huomaavat asuttavansa sellaista aluetta avaruudessa, jonka entropia on matala ja jonka alkutilan entropia oli vielä matalampi. (Boltzmann 1897; 1995, 447–448.) Universumia voidaan tässä ajatella tavallaan *multiversumina* (multiverse), jossa yhden kokonaisuniversumin sisällä sijaitsee monta entropiansa suhteen itsenäistä aluetta. Näiden alueiden entropian kasvusuunnat eivät välttämättä ole samat, jolloin myös niiden sisäiset ajan suunnat voivat olla toistensa kanssa vastakkaiset. Tämä vastaus ei itse asiassa selitä koko universumin alkutilan matalaa entropiaa, vaan vain tietyn alueen ja ajanjakson epätodennäköisen matalan entropian alkutilan. Siitä huolimatta vastaus selittää havaitut termodynaamiset ilmiöt (eli jokapäiväisten, normaalien, systeemien entropian kasvun), ja sen avulla voidaan määrittää ajan suunta ainakin tälle poikkeukselliselle alueelle. Universumin ajalla ei siis välttämättä olisi yksiselitteistä suuntaa, vaan ajan suunta olisi määriteltävä vain tietyille universumin alueille. Tähän ajatukseen palataan myöhemmin haarasysteemejä käsittelevässä luvussa.

Boltzmannin vastaukseen liittyen voidaan myös ajatella, että jos aika on ääretön, niin tässä äärettömässä ajassa tulee jossakin välissä tapahtumaan hyvin epätodennäköisiä tapahtumia. Universumin entropiakäyrä käy siis välttämättä jossakin vaiheessa hyvin matalalla luonnollisen entropian heilahdelun seurauksena. Ei siis taaskaan ole kovinkaan merkillistä, että löydämme itsemme tällaisen epätodennäköisen jakson alueelta. Tästä vastauksesta seuraa ajan suunta koko universumille, kun Boltzmannin vastauksesta seurasi ajan suunta vain tietylle universumin alueelle. Toisaalta taas tätkään vastauksesta ei seuraa matalan entropian ensimmäistä *alkutilaa*, vaan seurauksena on, että universumin tietty *ajanjakso* on voinut alkaa matalan entropian tilassa. Ajan suunta on siis tässä tapauksessa määritelty vain tälle tietylle ajanjaksolle, eikä universumin koko olemassaolon ajalle. Boltzmannin esittämän ajatuksen tavoin myös tämä vastaus selittää, miksi tällä hetkellä havaitaan, että universumin entropia on suhteellisen matala ja että normaalien termodynaamisten systeemien entropia kasvaa. Tämän vastauksen voidaan nähdä perustuvan *ajan äärettömyyteen*, kun edellinen vastaus perustui *avaruuden äärettömyyteen*. Esimerkiksi Reichenbachin (1956, luku 15) voidaan nähdä kannattavan tätä ajatusta haarasysteemihypoteesissaan.

Eräs vaihtoehto menneisyshypoteesin selittämiseksi on uusien, perustavampien, luonnonlakien kehittäminen (Callender, 2004, 252). Esimerkiksi Roger Penrose ehdottaa tällaista lähestymistapaa. Hän esittää, että tietty aika-avaruuden kaarevuuden mitta, Weyl kaarevuus, saa alkuräjähdyksessä arvon nolla, mutta kasvaa *loppurysäykseen* (Big Crunch) ja mustiin aukkoihin liittyvissä singulariteeteissa äärettömään. Tämän hän sanoo johtavan siihen, että alkuräjähdyksen singulariteetti on matalan entropian singulariteetti, ja loppurysäyksen singulariteetti olisi hyvin korkean entropian singulariteetti. Nyt tästä ajallisesta epäsymmetriasta johtuu se, että entropia kasvaa normaaleissa systeemeissä ja että maailma on suhteellisen matalan entropian tilassa. (Penrose 1989, 337.) Callenderin mukaan tämä uusi, ajassa epäsymmetrinen, laki ei kuitenkaan selitä menneisyshypoteesia. Hänen mukaansa ”Weyl kaarevuus -hypoteesi on vain menneisyshypoteesi puettuna hienoihin vaatteisiin. Menneisyshypoteesi seuraisi loogisesti eikä kausaalisesti Weyl kaarevuus -hypoteesista, eikä se selitä menneisyshypoteesia millään mielenkiintoisella tavalla.” Lisäksi Callender tuo esille, että jos löytyy laki, joka selittää menneisyshypoteesin, niin samalla menneisyshypoteesin epätodennäköisyys katoaa. (Callender 2004, 252–253.) Menneisyshypoteesin postuloimasta matalan entropian alkutilasta tulee siis todennäköinen tila, jos on olemassa laki, josta se seuraa kausaalisesti. Tämä taas ei ollut sitä, mitä haluttiin. Entropia määriteltiin tilan todennäköi-

syyden mukaan, jolloin tila, jolle on selitys ja syy, ei ole epätodennäköinen matalan entropian tila vaan todennäköinen korkean entropian tila.

Näiden selityksien lisäksi toiset (ks. esim. Hawking 1988, 145; Price 2004, 236–237) ovat esittäneet niin kutsutun *antrooppisen periaatteen* selittävän nykyuniversumin suhteellisen matalan entropian ja entropian kasvun normaaleissa termodynaamisissa systeemeissä. Antrooppisella periaatteella tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, että älyllistä elämää voi syntyä vain tällaisella matalan entropian alueella, jolla entropia kasvaa. Tästä ja meidän tosiasiallisesta olemassaolostamme johtuen on siis oltava niin, että tällä hetkellä on suhteellisen matala entropia ja että entropia kasvaa normaaleissa termodynaamisissa systeemeissä. Antrooppista periaatetta on yleisesti pidetty kehäpäättelmänä ja täten epätydyttävänä selityksenä. Lisäksi se ei selitä menneisyshypoteesia siinä muodossa, jossa Albert sen esittää, sillä se ei selitä universumin matalaa *alkutilaa*. Ihmisten olemassaolo ja havaitut termodynaamiset ilmiöt selittyvät paljon heikommallakin hypoteesilla, kuten normaalilla entropian heittelyllä (Price 2004, 236–237). Antrooppinen periaate ei anna syytä uskoa enempää, kuin mitä jo tiedetään. Se ei anna syytä uskoa menneisyshypoteesia, vaan ainoastaan jo ennestään havaitut ilmiöt (universumin nykyinen kohtalaisen matalan entropian ja termodynaamisten systeemien entropian kasvun).

#### 6.1.4 Inflaatioteoriat menneisyshypoteesin selittäjinä

Yksi suosituimmista universumin alkutilan homogeenisyyden selityksistä vetoaa avaruuden eksponentiaaliseen laajenemiseen (*kosmiseen inflatioon*). Tässä selityksessä universumin ajatellaan laajentuneen hyvin nopeasti heti sen synnyn jälkeen. Tämä laajeneminen tapahtui noin  $10^{-35}$  sekunnissa, ja tässä ajassa minimaalisessa ajassa universumin koko kasvoi mahdollisesti niin pienestä kuin  $10^{-33}$  senttimetristä jopa  $10^{10^{12}}$  senttimetriin (inflaation jälkeisen universumin laajuus riippuu teoriasta, mutta useimmissa se on suurempi kuin universumin havaittavissa oleva alue, joka on noin  $10^{28}$  senttimetriä) (Linde 1994, 51). Astrofysiikan mukaan universumissa on koko universumin kattava skalaarikenttä, joka kuvaa potentiaalisen energian suuruutta kussakin universumin kohdassa. Universumin energia taas koostuu nykytietämyksen mukaan 70–75 prosenttisesti *pimeästä energiasta* (dark energy), joten tämä skalaarikenttä kuvaa suurelta osin pimeän energian määrää universumissa. *Inflaatioteorioiden* ajatuksena on, että tämän skalaarikentän arvo oli hyvin suuri ennen inflaatiota ja inflaation aikana, mutta laajenemisen seurauksena pimeä energia muuttui säteilyksi ja

hiukkasiksi, jolloin skalaarikentän arvo laski alimpaan arvoonsa eli *tyhjiöön*<sup>44</sup> (vacuum). Energia-kenttä hakeutuu aina kohti vakaata alinta arvoa, eli todellista tyhjiötä, mikä selittää sen, miksi pimeä super-energia muuttui säteilyksi ja hiukkasiksi muuttaen tyhjiöenergian arvoa. Tyhjiöenergia kuvaa skalaarikentän arvoa tyhjiössä, eli pimeän energian määrää. Ennen inflaatiota universumin tila oli siis niin sanotussa *valetyhjiössä* (false vacuum), jossa pimeän energian arvo oli huomattavasti suurempi kuin nykyään, ja tyhjiö oli täynnä tätä pimeää super-energiaa. Tämän muutoksen valetyhjiöstä todelliseen tyhjiöön oletetaan vanhoissa inflaatioteorioissa tapahtuneen *faasimuutosten* (phase transition)<sup>45</sup> tavoin ja uudemmissa teorioissa siten, että tyhjiöenergia vaihtelee matalan ja korkean arvon välillä aina vähentyen kiihtyvällä tahdilla ja kasvaen hidastuvalla tahdilla, kunnes se lopulta asettuu alimpaan arvoonsa.<sup>46</sup> Pimeä energia selittää universumin nykyisen (kohtalaisen hitaan) laajenemisen, ja pimeä super-energia selittää universumin eksponentiaalisen laajenemisen (inflaation). (Linde 1994, 50–51; Carroll 2010, 320–328.) Suuriarvoisen skalaarikentän vaikutusta voi kuvata myös sanomalla, että painovoima muuttaa suuntaansa puoleensavetävästä voimasta luotaantyöntäväksi voimaksi. Tietyt klassiset lait eivät siis päde tässä valetyhjiössä, vaan maailmankaikkeuden voidaan huomata olevan hyvin erilainen riippuen siitä, mikä on kulloisenkin tilan energian minimiarvo (eli millainen tyhjiö on). (ks. esim. Guth 2004, 1–5; Price 2004, 235–236.)

Inflaatioteorioiden mukaan universumin eksponentiaalinen laajeneminen siis selittää menneisyyshypoteesin oletuksen homogeenisestä alkutilasta. Ongelmana oli, että painovoiman olisi pitänyt universumin ensi hetkinä vetää massoja yhteen klimpeiksi, jolloin tämän tilan olisi pitänyt olla hyvin epähomogeeninen ja epätasainen. Jos painovoiman ajatellaan olevan ennen inflaatiota toisen suuntainen, niin se selittää, miksi universumin ensimmäiset tilat olivat homogeenisia ja miksi universumin materia ja lämpö oli menneisyydessä jakautunut tasaisesti. Tästä seuraa kuitenkin myös ongelma, sillä juuri painovoima oli se syy, miksi tämä homogeeninen alkutila ylipäättään nähtiin epätodennäköiseksi ja siten matalan entropian tilaksi. Jos painovoiman suunta muutetaan, niin silloin homogeeninen tila onkin jälleen todennäköinen, eikä siis olisikaan matalan entropian tila. Esimerkiksi Callender näyttää olevan sitä mieltä, että menneisyyshypoteesia ei voida selittää ja säilyttää

<sup>44</sup> Tyhjiöllä tarkoitetaan tilaa, jossa vallitsee kunkin teorian alin mahdollinen energia-arvo (Carroll 2010, 327).

<sup>45</sup> Faasimuutos on muutos, jossa systeemin tila muuttuu äkillisesti toiseksi. Tällöin systeemin tilaa kuvaavissa funktioissa on epäjatkuvuuskohta. Esimerkiksi vettä keitetessä tapahtuu faasimuutoksia, kun sataasteinen vesi muuttuu äkillisesti vesihöyryksi. Veden tapauksessa faasimuutokset tapahtuvat osittain, sillä vain osa vedestä muuttuu kerrallaan vesihöyryksi, eikä koko kattilallinen tee tätä kerralla.

<sup>46</sup> Tämä kiihtyminen ja hidastuminen oletetaan siksi, että se selittää, miksi universumi saattaa pysyä valetyhjiön tilassa pitkiäkin aikoja ja universumi voi käydä läpi monia tällaisia valetyhjiön tiloja.

samaan aikaan. Jos alkutila seuraa luonnollisesti dynaamisista laeista, niin silloin se ei voi enää olla matalan entropian (epätodennäköinen) tila. Hän esittää, että jos menneisyshypoteesi halutaan säilyttää (pitää alkutila epätodennäköisenä) mutta samalla selittää, miksi universumi on syntynyt niin epätodennäköiseen tilaan, niin silloin on vedottava joko johonkin aika-avaruuden ulkopuolella olevaan seikkaan, tai sitten aika-avaruutta on ”lisättävä”. Koska menneisyshypoteesin postuloima tila on universumin alkutila, niin nykyisen tunnetun aika-avaruuden sisäiset seikat (muut kuin tunnetut luonnonlait) eivät voi antaa sille kausaalista selitystä. Toisaalta vaikka kausaalinen aika-avaruuden ulkopuolinen selitys voitaisiinkin antaa, niin siltikin on kysyttävä, miksi tämä uusi selittämätön hypoteesi tulisi hyväksyä menneisyshypoteesin sijasta. Ei ole mitään syytä suosia tätä uutta ”selitystä”, sillä samaan tapaan kuin menneisyshypoteesissa, myös siinä on oletettava jokin selittämätön asia. (Callender 2004, 251–252.)

Joidenkin inflaatioteorioiden postuloima *itsestään lisääntyvän universumin* (self-reproducing universe) hypoteesi saattaa kuitenkin osaltaan luoda oikeutusta menneisyshypoteesille. Tämän teorian ajatuksena on, että kun skalaarikentän arvo on korkea (universumi on valetyhjiössä) ja inflaatio on käynnissä, niin silloin muutos valetyhjiöstä todelliseen tyhjiöön ei tapahdu samanaikaisesti koko universumissa. Tässä mallissa vain tietyssä osassa universumia skalaarikentän arvo laskee, jolloin tämä osa tavallaan eristyy muusta universumista. Samalla tavalla voidaan ajatella kattilassa keitetävän veden muuttuvan vesihöyryksi. Tietty osa vettä muuttuu höyryksi ja muodostaa höyrykuplan veden sisälle. Nyt tämän valetyhjiön sisään syntyneen todellisen tyhjiön sisällä olosuhteet ovat sellaiset, että sen syntyy havaitaan alkuräjähdysteorian mukaisena (tasaisena, kuumana ja homogeenisena). Valetyhjiön pimeän super-energian arvo on kuitenkin edelleen paljon suurempi kuin tämän todellisen tyhjiön alueen pimeän energian arvo, jolloin valetyhjiö jatkaa eksponentiaalista laajenemista, kun todellisen tyhjiön alue laajenee sekin, mutta huomattavasti hitaammin. Nyt tässä valetyhjiössä voi syntyä uusia todellisen tyhjiön alueita, jotka ovat ominaisuuksiltaan hyvin samanlaisia kuin ensimmäinenkin todellisen tyhjiön alue. Jokaisen todellisen tyhjiön alueen sisällä niiden syntyy havaitaan alkuräjähdyksen tapaiseksi. Tässä teoriassa esitetäänkin, että meidän universumimme on vain yhden tällaisen *tasku-universumin* (pocket universe) alue, joka tosiasiallisesti sijaitsee huomattavasti suuremman valetyhjiössä olevan kokonaisuniversumin sisällä. Tällaisia tasku-universumeita taas voi olla ääretön määrä, ja niitä syntyy koko ajan lisää kokonaisuniversumin sisälle. Tasku-universumit voivat mahdollisesti leikata toistensa kanssa riippuen siitä, kuinka nopeasti niitä syntyy, mutta todennäköistä on, että ne eivät koskaan täytä kokonaisuniversumia, sillä sen laajenemisnopeus on huomattavasti suurempi kuin tasku-universumien. Tasku-universumit ovat siis omia eril-

lisiä yksilöitään. Lisäksi näissä tasku-universumeissa saattaa vallita eri luonnonlait riippuen skalaa-  
rikentän minimiarvoista, eli siitä, millaisia tyhjiöenergioita näillä tasku-universumeilla on. (ks.  
esim. Linde 1994, 54–55; Callender 2010, 328–333.)

Joka tapauksessa tämä ajatus näyttää tekevän menneisyshypoteesin uskottavammaksi, sillä se saat-  
taa selittää, miksi meidän tasku-universumimme syntyi siihen tilaan kuin se syntyi. Valetyhjiössä  
olevassa kokonaisuniversumissa saattaa vallita täysin erilaiset luonnonlait kuin meidän tasku-  
universumissamme, ja se voi sisältää mekanismeja, jotka tyypillisesti tuottavat tiloja, jotka vaikut-  
tavat tasku-universumin sisältä katsottuna epätodennäköisiltä. Esimerkiksi Carroll esittää, että vale-  
tyhjiössä oleva kokonaisuniversumi on hyvin matalan entropian tilassa, sillä se ei ole vakaa tila ava-  
ruudelle. Tällöin tasku-universumien syntymisen (eli joidenkin universumin osien siirtyminen to-  
dellisen tyhjiön tilaan) voidaan nähdä johtuvan entropian kasvusta, sillä nämä todellisen tyhjiön tilat  
ovat aina korkeamman entropian tiloja kuin valetyhjiön tilat. (Carroll 2010, 355–356.) Näin voitai-  
siin selittää, miksi universumi syntyi tällaiseen tilaan, joka vaikuttaa epätodennäköiseltä. Tässä ta-  
pauksessa menneisyshypoteesi ja termodynaaminen ajan suunta tietenkin koskisivat vain tätä tiet-  
tyä havaittavaa tasku-universumia, jossa ihmiset elävät. Toisaalta taas voidaan ajatella, että vaikka  
kokonaisuniversumi ei sisältäisikään matalan entropian alkutiloja tuottavia mekanismeja, niin koska  
se tuottaa äärettömästi tasku-universumeita, niin jokin niistä on välttämättä matalan entropian alku-  
tilassa. Tämä ajatus kierrättää Boltzmannin ideaa multiversumista, mutta tässä tapauksessa ainakin  
omassa universumissamme vallitsisi yhdenmukainen ajan suunta.

Tasku-universumeihin vetoavassa vastauksessa käytetään juuri toista Callenderin mainitsemaa  
menneisyshypoteesin selitystä, sillä siinä juuri ”lisätään” aika-avaruutta nykyisen universumin  
päälle. Nyt voidaankin kysyä, mikä on ajan suunta tässä kokonaisuniversumissa. Carroll esittää, että  
tämä kokonaisuniversumi syntyy hyvin matalaan entropian tilaan (valetyhjiöön), ja sen jälkeen se  
hakeutuu korkeamman entropian tiloihin tuottamalla tasku-universumeita, joissa vallitsee korkeam-  
pi entropia kuin valetyhjiössä (tasku-universumien sisäinen entropia voi silti olla matala, vaikka se  
olisikin korkeamman entropian tila kuin valetyhjiö). Näin entropian kasvun suunta kokonaisuniver-  
sumissa olisi myös kokonaisuniversumin ajan suunta. Mikä nyt selittää sen, että kokonaisuniversu-  
mi syntyy matalan entropian tilaan? Kokonaisuniversumin matalan entropian alkutilan oletaminen  
on periaatteessa menneisyshypoteesin laajentamista koskemaan tasku-universumin sijasta ko-  
konaisuniversumia. Carrollin vastaus on, että todellisen tyhjiön tasku-universumin saavuttaessa

termodynaamisen tasapainotilan (maksimientropian) tämä tila ei olekaan vakaa. Hänen mukaansa tasapainotilasta voi syntyä uusia valetyhjiön alueita kvanttiheilahtelujen tuloksena. Nämä valetyhjiön alueet useimmiten kutistuvat pois, mutta toisinaan ne voivat erottua tasapainotilan alueesta ja muodostaa oman erillisen *vauvauniversumin* (baby universe). Näissä vauvauniversumeissa vallitsee valetyhjiö, ja niissä on siis pimeää super-energiaa. Tämä pimeä super-energia saa aikaan vauvauniversumin inflaation, ja vauvauniversumista muodostuu uusi kokonaisuniversumi. Tasapainotilassa olevat tasku-universumit siis synnyttävät matalan entropian vauvauniversumeita, jotka kehittyvät kokonaisuniversumeiksi. (Carroll 2010, 355–359.) Tämä teoria on tietysti vahvasti hypoteettinen ja kaipaisi lisää tutkimista. Se kuitenkin vaikuttaa mielenkiintoiselta tavalta selittää kokonaisuniversumien matalan entropian alkutilat. Lisäksi tässä ei tarvitse olettaa, että *ensimmäinen* universumi olisi syntynyt matalaan entropiaan, sillä matalan entropian kokonaisuniversumit syntyvät juuri maksimientropiassa (termodynaamisessa tasapainotilassa) olevista universumeista. Teorian heikkona puolena voidaan kuitenkin nähdä se, että se ei luo yhdenmukaista ajan suuntaa *kaikille* kokonaisuniversumeille. Vauvauniversumien syntyessä ne nimittäin eristyvät vanhasta tasku-universumista ja vanhasta kokonaisuniversumista, ja aloittavat uuden oman ajallisen kiertonsa.

### 6.1.5 Menneisyshypoteesi selittämättömänä hypoteesina

Menneisyshypoteesille on yritetty löytää monia eri selityksiä, mutta ainakin tähän asti ne ovat kaikki kohdanneet omat ongelmansa. Tarvitseeko menneisyshypoteesi kuitenkin selitystä? Yleensä alkutilan ajatellaan olevan erityinen tila, joka tapahtuu vain kerran, ja jota ei voida selittää kausaalisesti, koska se on ensimmäinen tila. Kuitenkin muun muassa Price argumentoi selityksen tarpeellisuuden puolesta. Hän esittää, että jos maailmassa ei ole objektiivista tulevaisuuden suuntaa (niin kuin siinä ei tunnu olevan ilman entropiaa), niin silloin maailma, jossa tapahtumat tapahtuvat käänteisessä järjestyksessä, ei eroa omasta maailmastamme. Tällaisessa maailmassa menneisyshypoteesista tulee hypoteesi, joka koskee universumin viimeistä tilaa. Tällainen epätodennäköinen viimeinen tila, johon universumi kehittyy, on todellakin selityksen tarpeessa. Pricen mukaan ajatus, että alkutila ei kaipaa selitystä, sisältää ajallisen ennakkoluulon, joka ei ole oikeutettu. Jos epätodennäköinen lopputila kaipaa selityksen, niin selityksen kaipaa myös epätodennäköinen alkutila, koska lopputilan ja alkutilan välillä ei ole objektiivista eroa maailmassa, jossa ajalla ei ole suuntaa. (Price 2004, 229–231.)

Toisaalta voidaan ajatella myös, että menneisyshypoteesi ei kaipaa selitystä. Jostakin syystä tunnemme ajattelevan, että jotkin perustavaa laatua olevat asiat (kuten menneisyshypoteesi) kaipaavat selityksen kun taas toiset (kuten Jumalan olemassaolo) eivät. Sklarin mukaan esimerkiksi Immanuel Kantin ajatteli, että jos kaikella uskotaan olevan syy, niin se johtaa kaikkein perimmäisen tai ensimmäisen syyn etsimiseen. Perimmäisen syyn käsitteen ja ajatuksen Kant taas näkee epäkoherentiksi. Sklar huomauttaa myös, että tapahtumien todennäköisyydet on perinteisesti määritelty niiden esiintymistaajuuden mukaan. Universumi syntyy vain kerran, joten alkutilan todennäköisyys ei ole hyvin määritelty käsite. Täten ei voida sanoa, että alkutila on epätodennäköinen, ja kaipaa siksi selityksen. (Sklar 1993, 311–313.) Jotkin asiat tulee teoriassa kuin teoriassa aina ottaa perustavina aksioimina, mutta mikä seikka sitten tekee toisesta oletuksesta selitystä kaipaavan ja toisesta perustavan?

Callenderin mukaan tällaista erillistä seikkaa ei ole olemassa, ja on väärin olettaa, että esimerkiksi hypoteesin epätodennäköisyys tarkoittaisi, että se kaipaa selityksen. Hän ehdottaakin, että teoreettista systeemiä tarkastellaan kokonaisuutena, ja arvioimme systeemin empiiristä selitysvoimaa ja todistusaineistoa. Menneisyshypoteesia tulisikin hänen mielestään tarkastella luonnonlakina, ja osana koko fysiikan systeemiä. Lisäksi Callender esittää, että omaksumalla Ramsey-Lewis näkemyksen luonnonlaeista, voimme sisällyttää menneisyshypoteesin tähän lakien joukkoon. (2004, 247–250.) Ramsey-Lewis teoria luonnonlaeista sanoo karkeasti, että systeemin toistuvuus on laki, jos se on parhaan teoreettisen systeemin teoreema (Lewis 1994, 478). Callender näkee siis, että menneisyshypoteesi kuuluu parhaan teoreettisen systeemin aksioomiin ja että näillä kaikilla aksioomilla on sama lain status. Lewis näyttää kuitenkin nimenomaan oletettavan, että lain tulee olla toistuva, ja vain kerran tapahtuvat tapahtumat eivät täten voisi saavuttaa lain statusta. Callenderin ehdotus ei siis tiukasti katsoen sovi Ramsey-Lewis malliin. Menneisyshypoteesin selitettävyyys ja selityksen tarve ovat kuitenkin kaksi eri seikkaa, ja jotkin asiat maailmassa on aina otettava selittämättöminä. Miksi emme voisi ottaa menneisyshypoteesia tällaisena selittämättömänä faktana? Menneisyshypoteesin asema onkin tieteellisessä keskustelussa vielä avoin.

## 6.2 Haarasysteemit

Eräänlaisena menneisyshypoteesin johdannaisena voidaan nähdä esimerkiksi Reichenbachin ja Grünbaumin suosima *haarasysteemi* (branch systems) vetoava teoria. Haarasysteemi on näissä



teorioissa systeemi, joka haarautuu suuremmasta pääsysteemistä omaksi erilliseksi alisysteemikseen, ja jossakin vaiheessa palaa takaisin osaksi pääsysteemiä.

### 6.2.1 Reichenbachin haarasysteemit

Reichenbachin esimerkki haarasysteemistä on lumen keskellä oleva kivi, jota aurinko lämmittää päivällä. Tässä on kyseessä pääsysteemi, johon kuuluvat aurinko, kivi ja lumi. Lisäksi tässä systeemissä entropia kasvaa päivällä, sillä kivi ja lumi ottavat vastaan lämpöenergiaa auringosta. Kun aurinko laskee illalla, niin tästä pääsysteemistä erottuu omaksi haarasysteemikseen vain kiven ja sen ympärillä olevan lumen muodostama systeemi. Tässä haarasysteemissä vallitsee kuitenkin matala entropia, sillä kivi on imenyt itseensä enemmän lämpöä kuin lumi, ja on siis selkeästi sitä ympäröivää lumea lämpimämpi. Lämpötilaerot ovat siis tämän haarasysteemin sisällä aluksi suuret. Yön aikana kivi antaa lämpöä lumelle, jolloin kivi jäähtyy ja lumi sen ympäriltä lämpenee ja sulaa ainakin jonkin verran. Tämän haarasysteemin entropia siis kasvaa yön aikana. Auringon noustessa haarasysteemi palautuu jälleen osaksi pääsysteemiä, ja aurinko alkaa jälleen lämmittää kiveä enemmän kuin lunta. Tällöin pääsysteemin entropia jälleen kasvaa, mutta siihen palautuneen haarasysteemin (kivi ja lumi, jotka tässä siis eivät enää muodosta erillistä omaa haarasysteemiään) entropian nähdäänkin laskevan. Nyt Reichenbach esittää, että luonnossa tällaiset haarasysteemit alkavat aina matalamman entropian tiloista, ja kehittyvät kohti suuremman entropian tiloja, jonka jälkeen ne taas yhdistyvät pääsysteemiin. Vaikka haarasysteemit alkavat matalan entropian tiloissa, niin pääsysteemien entropia kuitenkin kasvaa prosessissa, jossa sen alisysteemi (siitä haarautuva systeemi) kehittyy järjestyneeksi matalan entropian systeemiksi. (Reichenbach 1956, 118.)

Haarasysteemit ovat Reichenbachin vastaus edellä esitettyyn käännettävyyssvastaväitteeseen. Oletetaan nyt, että A on jonkin systeemin tila, jossa entropia on matala ja että B on saman systeemin tila, jossa entropia on korkea. A ja B viittaavat siis mihin tahansa tiloihin, joissa entropia on tietyn suuruisen (A:ssa tietty matala arvo ja B:ssä tietty korkea arvo). Käännettävyyssvastaväitteen mukaan todennäköisyys, että tila B vallitsee jonkin tietyn ajan  $\Delta t$  kuluttua A:sta, on sama kuin todennäköisyys, että tila B vallitsi samaa aikaa  $\Delta t$  ennen A:ta. Tässä todennäköisyydellä ymmärretään juuri frekvenssiä, eli havaintotiheyttä. Nämä todennäköisyydet ovat samat, koska jos systeemi pysyy suljettuna tarpeeksi pitkään, niin korkean entropian tilan (B) havaitaan seuraavan matalan entropian tilaa (A) tietyn ajan ( $\Delta t$ ) kuluttua *yhtä usein*, kuin korkean entropian tilan (B) havaitaan edeltävän matalan entropian tilaa (A) tiettyä aikaa ( $\Delta t$ ) ennen tätä. Todennäköisyys on tässä tapauksessa siis

yhden systeemin sisällä havaittu havaintotiheys. Menneisyshypoteesissa universumin entropiaa ajatellaan kokonaisuutena, ja siinä koko universumi ajatellaan yhdeksi systeemiksi. Tämän systeemin todennäköisyydet on ymmärrettävä juuri edellä esitetyn havaintotiheyden mukaan. Menneisyshypoteesin vastaus tähän todennäköisyyksien yhtäläisyyteen oli olettaa, että systeemi syntyi matalan entropian tilassa ja että systeemi ei ole ollut niin kauaa suljettu, että siinä olisi ehtinyt tapahtua useampi kuin yksi merkittävä entropian lasku tai nousu. Edellä esitettiin menneisyshypoteesia vastaan kritiikkiä koskien sitä, että todennäköisyys ei voi siinä tarkoittaa frekvenssiä. Jos B:n on havaittu seuraavan A:ta vain kerran, ja B:n ei ole havaittu edeltävän A:ta kertaakaan, niin silloin näiden havaintojen todennäköisyydellä ei voida ymmärtää ainakaan niiden havaintotiheyttä.

Reichenbach kuitenkin esittää, että haarasysteemien avulla tästä todennäköisyyksien yhtäläisyydestä voidaan päästä eroon, ja samalla voidaan säilyttää myös mielekäs käsitys todennäköisyydestä. Todennäköisyyttä ei tässä tapauksessa voida hänen mukaansa ymmärtää samalla tavalla kuin yhden systeemin sisäisessä tapauksessa. Haarasysteemien elinaika on niin pieni, että niissä ei havaita montaa eri tapausta, jolloin entropia olisi tietyn suuruinen. Matalan ja korkean entropian tiloja A ja B ei siis ole mahdollisesti muita kuin yhdet kumpaakin. Toisin sanoen haarasysteemien rajattu elinaika pitää aikavälin  $\Delta t$  pienenä tilojen A ja B välillä, mikä takaa, että tälle aikavälille ei mahdu montaa entropian laskua ja nousua. Nyt huomataan, että (kuten menneisyshypoteesin tapauksessa) tässäkään ei voida käyttää yhden systeemin sisäistä havaintotiheyttä todennäköisyyden määrittelemiseen. Reichenbachin ratkaisu onkin käyttää monen systeemin todennäköisyyttä, jolloin todennäköisyydet määritellään sen mukaan, kuinka monessa eri systeemissä B:n havaitaan seuraavan A:ta ja kuinka monessa B:n edeltävän A:ta. (Reichenbach 1956, 121–123.) Ajatus tässä yhden systeemin ja monen systeemin todennäköisyyksien määritelmässä on sama kuin seuraavassa esimerkissä: Jos halutaan selvittää, millä todennäköisyydellä kolikonheitossa tulee kruuna, niin voidaan toimia kahdella tavalla. Voidaan joko heittää yhtä kolikkoa monta kertaa, ja havainnoida kuinka monta kertaa näistä heitoista on tullut kruuna, sekä laskea todennäköisyys tästä havaintotiheydestä. Tämä tapa vastaa yhden systeemin todennäköisyyttä. Toinen tapa selvittää kruunan todennäköisyys on heittää monta kolikkoa kerralla, ja havainnoida kuinka monta näistä kolikoista antaa tulokseksi kruunan. Tämä tapa taas vastaa Reichenbachin suosimaa monen systeemin todennäköisyyttä.

Reichenbach olettaa siis, että haarasysteemeillä on rajattu elinaika, eli ne haaraautuvat pääsysteemistä, ja aina palaavat osaksi pääsysteemiä tietyn ajan kuluttua. Lisäksi haarasysteemit saavat alkunsa

matalan entropian tilassa, jolloin niiden entropia kasvaa niiden ollessa omia erillisiä systeemejään. (Reichenbach 1956, 118.) Haarasysteemien nähdään siis toteuttavan menneisyshypoteesin kaksi ehtoa: ne alkavat matalan entropian tilassa, ja niiden elinaika on niin lyhyt, että ne eivät ole käyneet läpi montaa merkittävää entropian laskua ja nousua. Niissä siis näkyy vielä matalan entropian alkutilan *jälkivaikutus*, joka takaa Reichenbachin (1956, 121–122) mukaan sen, että todennäköisyys (ymmärrettynä monen systeemin todennäköisyytenä), että korkean entropian tila B *seuraa* matalan entropian tilaa A on *suurempi kuin* todennäköisyys, että B *edeltää* A:ta. Tällä matalan entropian alkutilan jälkivaikutuksella tarkoitetaan, että jos matalan entropian tila A on ajallisesti tarpeeksi lähellä alkutilaa, niin on hyvin epätodennäköistä, että entropia ehtisi kasvaa korkeaksi (tilaan B) ja palata matalaksi (tilaan A) tämän lyhyen aikavälin aikana. Täten on todennäköisempää, että B havaitaan vasta A:n jälkeen kuin ennen sitä.

Näin Reichenbach (1956, 125) sanoo selvittäneensä käännettävyyvastaväitteen ongelman monen systeemin todennäköisyyden avulla. Tässä haarasysteemien teoriassa todennäköisyys määritellään mielekkäästi havaintotiheydeksi monessa systeemissä, ja tämä havaintotiheys vaikuttaa olevan selvästi eri tapauksissa, joissa B seuraa A:ta ja tapauksissa, joissa B edeltää A:ta. Nyt Reichenbach (1956, 127) esittääkin, että se ajan suunta, johon entropia kasvaa *suurimmassa osassa* haarasysteemeissä tapahtuvista prosesseista, tulee määritellä *tulevaisuuden suunnaksi*.

Universumia voidaan tässä tapauksessa ajatella ultimaattisena pääsysteeminä, joka koostuu hyvin monesta haarasysteemistä. Koska pääsysteemit koostuvat haarasysteemeistä, niin haarasysteemien entropian kasvusuunta on sama kuin pääsysteemin (tässä koko universumin) entropian kasvusuunta. Pääsysteemin entropia on siis haarasysteemien entropian summa. Kuten aiemmin on todettu, niin universumin entropia voi kasvaa ja laskea samaan ajan suuntaan mentäessä eri aikoina (katso esimerkiksi kuva 5.2). Tämä johtaa mielenkiintoiseen seuraukseen haarasysteemien avulla määritellylle ajan suunnalle. Nimittäin nyt myös haarasysteemien avulla määriteltä tulevaisuuden suunta voi vaihdella eri ajanjaksojen välillä. Ajalle ei siis voida Reichenbachin mukaan määrittää yksikäsitteistä tulevaisuuden suuntaa, vaan tulevaisuuden suunnalla on *jaksollinen luonne*. (Reichenbach 1956, 127–128.) Haarasysteemihiypoteesi siis sanoo, että tulevaisuus voi kulkea eri ajanjaksoina eri suuntaan ajassa. Näitä ajanjaksoja kuitenkin erottaa aina ajanjakso, jolloin entropia oli korkeassa tasapainotilassa ja jolloin elämä ei ole mahdollista. Tällaista ajan suunnan vaihtumista ei siis ole mahdollista havaita, minkä lisäksi mahdolliset kirjalliset kuvaukset tulevaisuuden suunnasta kulkevat

aina entropian kasvusuuntaan, ja kuvaavat siis samanlaisia prosesseja riippumatta siitä, että tulevaisuuden suunta on vaihtunut.

Jotta haarasysteemihypoteesi toimisi, niin siinä on kuitenkin tehtävä tiettyjä oletuksia, joiden Reichenbach sanoo olevan vain empiirisesti todistettavissa. Ensinnäkin on oletettava, että universumin entropia on tällä hetkellä kohtalaisen matala ja että se sijaitsee entropiakäyrän mäessä. Toiseksi oletetaan, että on olemassa monia haarasysteemejä, jotka ovat pääsysteemistä erillisiä, mutta molemmista päistään siihen yhdistettyjä. Kolmanneksi täytyy olettaa, että haarasysteemien entropiatilojen todennäköisyys voidaan laskea edellä mainitun monen systeemin todennäköisyyden kaavalla. Neljänneksi on oletettava, että suurimmassa osassa haarasysteemejä toinen pää on matalan entropian tila ja toinen korkean entropian tila. Lopulta viidenneksi oletetaan, että suurin osa haarasysteemeistä kasvaa entropiassaan samaan suuntaan ja että tämä suunta on sama kuin pääsysteemin entropian kasvusuunta. (Reichenbach 1956, 136–138.) Näitä oletuksia voidaan tietenkin kritisoida niiden a posteriori luonteen vuoksi. Esimerkiksi Mehlberg (1961, 117) on haarasysteemihypoteesia vastaan juuri sen perusteella, että se tuottaa vain de facto ajallisen anisotropian eikä nomologista anisotropiaa. On hyvä pitää myös mielessä, että koska tämä anisotropia todella on de facto, niin voitaisiin kuvitella, että maailmassa olisi jokin nomologinen piirre, joka tuottaa tämän de facto anisotropian.

Lisäksi voidaan esittää, että Reichenbach ei tuo teoriassaan riittävän selvästi esille fysikaalisen ajan suunnan ja psykologisen ajan suunnan eroa. Entropian kasvu haarasysteemeissä saattaa selittää psykologisen ajan suunnan, mutta sanoessaan, että ajan suunta voi vaihdella eri ajanjaksojen välillä, Reichenbach näyttää kuitenkin implisiittisesti olettavan ajan – ja ainakin tietyssä mielessä sen suunnan – olemassaolon erillään entropiasta. Reichenbach esitteleeikin *superajan* (super-time) käsitteen, jolla hän tarkoittaa, että tapahtumat voidaan järjestää ajassa, mutta ei voida kuitenkaan sanoa, kumpi suunta tässä superajassa on tulevaisuuden suunta. Superaika on hänen mukaansa seurausta klassisen mekaniikan laeista, sillä kausaalinen ajanteoria sanoo, että niistä seuraa kaikkien tapahtumien lineaarinen järjestys. (Reichenbach 1956, 128–129.) Superajalla ei kuitenkaan ole suuntaa ilman entropiaa, sillä ilman entropiaa ei tiedetä, kumpi tapahtuma kahdesta on kumman syy (eli näistä kahdesta aikaisempi tapahtuma).

Superaika vaikuttaa mielestäni hyvin samanlaiselta konseptilta kuin ajan suunnistuvuuden tuottama ajan suunta. Superajalle ei Reichenbachin mukaan voida määrittää yksiselitteistä suuntaa, vaan aika voi kulkea eri suuntiin eri ajanjaksoina. Lisäksi hän esittää, että sen suunnasta ei ole mielekästä puhua ajanjaksoina, jolloin vallitsee termodynaaminen tasapainotila. (1956, 126–127.) Mielestäni sen suunnat on kuitenkin voitava ainakin erottaa toisistaan, vaikka niistä ei voitaisikaan yksilöidä toista tulevaisuuden suunnaksi. Jos superajan suuntia nimittäin ei voitaisi erottaa toisistaan, niin ei olisi myöskään mielekästä sanoa, että aika kulkee eri suuntiin eri ajanjaksoina. Tässä on tärkeää erotella toisistaan fysikaalisen ajan (superajan tai aika-avaruuden ajallisen ulottuvuuden) suunta ja psykologinen ajan (ihmisten havaitseman ajan) suunta. Näyttää siltä, että Reichenbach ymmärtää ajan suunnalla yksinomaan psykologista ajan suuntaa, eli ihmisten kokemaa tulevaisuuden suuntaa. Ihmisestä riippumaton fysikaalinen ajan suunta, johon aika kasvaa ja objektiivinen tulevaisuus (verrattuna ihmisten kokemaan subjektiiviseen tulevaisuuteen) kulkee, tulisikin määritellä superajan jommaksikummaksi suunnaksi. Tämä saattaa kuitenkin osoittautua mahdottomaksi tehtäväksi, ainakin jos oletetaan, että kokemuksen tuottama ajan suunta on aina sama kuin fysikaalinen ajan suunta. Reichenbach vaikuttaakin laittavan ajan termodynaamisessa reduktiossa psykologisen ajan suunnan fysikaalisen ajan suunnan edelle. Psykologinen ajan suunta palautuu entropian kasvuun, mutta fysikaalinen aika (superaika) ja sen suunta ei. Nyt siis Reichenbachin näkemyksen mukaan täytyisi olettaa, että fysikaalisella ajalla (superajalla) ei ole tiettyä kulkusuuntaa ollenkaan. Toisin sanoen ajan suunnista kumpikaan ei ole ensisijainen, vaikka ne ovatkin toisistaan erotettavissa. Tässä voidaan nähdä analogia avaruudellisiin suuntiin, sillä nekin vaikuttavat olevan toisistaan erotettavia (pariteettimuunnoksen epäsymmetrian mukaan), mutta avaruudella ei kuitenkaan ole preferenssiä oikeaan tai vasempaan suuntaan. Haarasysteemihypoteesi siis tuottaa fysikaalisen perusteen ihmisten havaitsemalle ajan suunnalle, mutta se ei tuota fysikaalista perustetta ajan suunnalle sinänsä.

### 6.2.2 Grünbaum haarasysteemeistä

Grünbaum ottaa tavanomaiseen tapaansa paljon vaikutteita Reichenbachilta, mutta hänen tavoitteensa on myös kritisoida ja parannella Reichenbachin haarasysteemihypoteesia. Grünbaum esittää, että haarasysteemien kehityksellä on kaksi tapaa, jotka seuraavat haarasysteemien de facto ominaisuuksista (edellä mainitut viisi kokemukseen perustuvaa oletusta haarasysteemeistä) ja statistisen mekaniikan periaatteista: Haarasysteemit voivat syntyä joko suhteellisen matalan entropian tilaan tai korkean entropian tasapainotilaan. Jos haarasysteemi syntyy matalan entropian tilaan, niin silloin systeemi on aikaväliä  $\Delta t$  myöhemmin hyvin todennäköisesti korkeamman entropian tilassa. Aikavä-

liä  $\Delta t$  aiemmin taas systeemiä ei ole edes ollut olemassa, joten sen entropiasta ei ole mielekäästä puhua. Jos taas haarasysteemi syntyy korkean entropian tilaan, niin silloin aikaväliä  $\Delta t$  myöhemmin systeemi on hyvin todennäköisesti edelleen korkean entropian tilassa. Nyt Grünbaumin mukaan nämä mahdolliset kehitykset tuottavat ajallisen anisotropian, jonka pohjalle ajan suunta voidaan perustaa. Tulevaisuuden suunnaksi tuleekin hänen mukaansa määritellä se ajan suunta, johon *tyypillisen haarasysteemin entropia kasvaa*. (Grünbaum 1963, 257–259.)

Reichenbachista poiketen Grünbaum (1963, 259) kuitenkin esittää, että tämä haarasysteemien tuottama *anisotropia on sama* kaikkina ajanjaksoina, joina universumi ei ole tasapainotilassa entropiansa suhteen. Toisin sanoen suurin osa haarasysteemeistä kasvaa entropiassaan (tai pysyy korkean entropian tilassa) ajan kulkusuuntaan aina, kun koko universumin entropia ei ole korkeassa tasapainotilassa. Tässä siis ajan suunnan ei nähdä vaihtelevan eri ajanjaksoina. Grünbaum ei siis postuloi Reichenbachin superaikaa ollenkaan, ja hänen ei nähdä erottelevan toisistaan fysikaalista ja psykologista ajan suuntaa. Ajalla nähdään olevan suunta vain yhdessä mielessä, ja tämä suunta on se suunta, johon tyypillisen haarasysteemin entropia kasvaa. Lisäksi Grünbaum näyttää olettavan, että universumin entropia ei ole koskaan kaikkialla universumissa tasapainotilassa. Tällöin universumissa on aina joitakin haarasysteemejä, joissa entropia kasvaa. (Grünbaum 1963, 261.) Täten ajalla olisi yksiselitteinen suunta kaikkina aikoina, ja olisi käsittämätöntä sanoa, että se ajan suunta, johon entropia kasvaa, vaihtelee ajanjaksosta toiseen. Mielestäni tämä oletus vaikuttaa uskottavammalta kuin oletus, että universumi saattaisi joskus olla niin täydellisessä tasapainotilassa, että missään haarasysteemeissä entropia ei muuttuisi (toisin sanoen kasvaisi, koska entropian kasvusuunta määritellään ajan suunnaksi).

Grünbaum olettaa siis vain jonkin yksittäisen universumin alueen entropisen epätasapainotilan riittävän ajan suunnan määrittämiseen. Tämän hän voi tehdä siksi, että hän ei oleta, että koko universumin yhteinen entropia olisi määriteltävissä. Reichenbach oletti, että haarasysteemien entropia kasvaa samaan suuntaan kuin pääsysteemin (universumin) entropia, jolloin ajan suunta oli hänelle sama kuin koko universumin entropian kasvusuunta. Grünbaum kuitenkin onnekseen välttää tämän johtopäätöksen, sillä juuri se johti Reichenbachin esittämään, että ajan suunta vaihtelee, koska entropia kasvaa ja vähenee fysikaalisessa superajassa. Grünbaum sanookin, että koko universumin entropiaa ei voida edes periaatteessa määritellä, jos universumi on ääretön. Jos äärettömässä universumissa on ääretön määrä hiukkasia, niin statistisessa entropian määritelmässä  $S(X) = k \times$

$\log|\Gamma(X)|$  makrotilan  $X$  tuottamien mikrotilojen lukumäärä  $|\Gamma(X)|$  kasvaa äärettömäksi. Tällöin entropiaa ei voida määritellä, jos äärettömässä universumissa on ääretön määrä hiukkasia. Jos taas äärettömässä universumissa hiukkasten määrä on äärellinen, niin tasapainotilaa ei voida määritellä, sillä hiukkasten olisi siinä jakaannuttava tasaisesti kaikkiin universumin ”lokeroihin”, joita on äärettömässä universumissa ääretön määrä. Äärellisen hiukkasten määrän jakaminen äärettömään mo-  
neen lokeroon tasaisesti taas ei ole mahdollista. Statistisessa termodynamiikassa taas systeemin tasapainotila (maksimientropia) on oltava määritelty, jotta sen entropiasta olisi mielekäästä puhua. (Grünbaum 1963, 262.)

Jos kuitenkin universumi on äärellinen ja sellainen, että sen entropia voidaan kokonaisuutena määrittää, niin silloin universumin entropia on yhden systeemin entropiakäyrän (katso kuva 5.2) kaltainen. Tässä tapauksessa Grünbaum tunnustaa, että hänen muotoilemansa yhtenäinen ajan suunta ei toimisi. Tällöin nimittäin olisi Reichenbachin tapaan oletettava, että koko universumin entropia saadaan additiivisesti haarasysteemien entropiasta, jolloin myös niiden kasvusuunnat ovat samat. Nyt olisikin tunnustettava, että ajan suunta vaihtelee ajanjaksosta toiseen. Grünbaum jättääkin avoimeksi kysymyksen sen, onko äärellisessä universumissa mahdollista esittää haarasysteemien entropian aina kasvavan ajassa. (Grünbaum 1963, 262–263.)

Toisin kuin Reichenbachin teoriassa on siis Grünbaumin haarasysteemeihin perustuva ajan suunta sama kaikkina ajanjaksoina. Lisäksi Grünbaum ei joudu erottelemaan toisistaan fysikaalista ja psykologista ajan suuntaa tai postuloimaan superaikaa, jossa entropia kasvaa ja vähenee. Hän ei kuitenkaan kykene tyydyttävästi selittämään, millä tavalla hänen teoriansa saadaan toimimaan äärellisessä avaruudessa. Itse näen Grünbaumin teorian selittävän ajan suunnan fysikaalisen perustan paremmin kuin Reichenbachin version, sillä siinä ei tyydytä selittämään vain havaittua psykologista ajan suuntaa, vaan se antaa ajalle suunnan sinänsä. Grünbauminkaan versio haarasysteemihipoteesista ei kuitenkaan ei jää ongelmattomaksi varsinkaan äärellisen avaruuden tapauksessa.

## 7 TERMODYNAMIIKKA JA PSYKOLOGINEN AJAN SUUNTA

Koemme intuitiivisesti, että tulevaisuuden ja menneisyyden välillä on selkeitä ja merkittäviä eroja: Meillä on *jälkiä* (records) menneisyydestä, mutta ei tulevaisuudesta, tiedämme paljon enemmän menneisyydestä kuin tulevaisuudesta, ja tietomme menneisyydestä vaikuttaa meistä hyvin erilaiselta kuin ”tietomme” tulevaisuudesta. Tieto menneisyydestä on usein varmaa, kun taas tieto tulevaisuudesta on vain epävarmaa ennustamista. Tulevaisuuteen voidaan vaikuttaa, mutta menneisyyteen ei, ja menneisyydellä vaikuttaa olevan determinoitu realiteetti, ja tulevaisuudella vain potentiaali. Lisäksi meillä vaikuttaa olevan suoraa ja välitöntä tietoa tapahtumien ajallisesta järjestyksestä – olivatpa nämä tapahtumat ulkoisia (ulkomaailman tapahtumia, jotka ovat havaittavissa) tai sisäisiä (oma sisäinen kokemuksemme ajasta). (Sklar 1993, 110.) Voidaanko näitä psykologisia eroja menneisyyden ja tulevaisuuden välillä selittää termodynaamisten ajan suunnan teorioiden avulla? Tähän kysymykseen haetaan vastausta nyt käsiteltävässä luvussa, jossa tarkoituksena on esitellä ajan suunnan termodynaamista reduktiota ja sitä vastaan esitettyä kritiikkiä.

### 7.1 Ajan suunnan termodynaaminen reduktio

Termodynaamisella reduktiolla tarkoitetaan ajatusta, että ajan suunta voidaan palauttaa termodynaamisiin ilmiöihin. Edellä esiteltiin termodynaaminen ajan suunnan teoria, jossa esitettiin, että tulevaisuuden suunta on se suunta, johon entropia kasvaa. Termodynaamisessa reduktiossa on kuitenkin kysymys siitä, että ajan itsessään oletetaan muodostuvan vain termodynaamisista ilmiöistä. Sklar esittää, että termodynaamista ajan suunnan teoriaa voidaan ajatella *korrelaationa* ajan suunnan ja entropian kasvun välillä, kun taas termodynaaminen reduktio vaatii *identifikaation* näiden välille. Jos ajan suunta halutaan palauttaa entropian kasvuun, niin silloin entropian kasvun on selitettävä myös edellä mainitut psykologiset kokemukset menneisyyden ja tulevaisuuden eroista. (Sklar 1993, 109–110.)

#### 7.1.1 Jälkien anisotropian reduktio

Reichenbach esittää, että entropian kasvu selittää, miksi menneisyydestä on olemassa jälkiä, mutta tulevaisuudesta tällaisia samanlaisia jälkiä ei ole. Tulevaisuutta voidaan ennustaa tiettyjen havaintojen avulla, mutta siitä ei näytä olevan sellaisia jälkiä, jotka ovat indikaattoreita siitä, mitä tulevaisuudessa tapahtuu. Menneisyyden jäljistä voidaan päätellä paljon varmemmin, mitä vuorovaikutuksia menneisyydessä on tapahtunut, kuin mitä tällaisia tulevia vuorovaikutuksia voidaan ennustaa.



nykyisistä havainnoista. Reichenbach lähtee liikkeelle ajatuksesta, että mikroprosessien (kuten hiukkasten liike) ja makroprosessien (kuten hiekkarannan pinnan tasoittuminen tuulen seurauksena) välillä on selkeä ero siinä mielessä, että mikroprosessit sisältävät *luonnollisen sekoitusmekanismin* (hiukkasten liikkeiden tasoittuminen törmäysten kautta), mutta makroprosessit eivät sisällä tällaista mekanismeista. Tästä johtuen makroprosessit säilyvät matalan entropian tiloissa huomattavasti pitempään, ja makroprosessien matalan entropian tiloja pystytään havaitsemaan useammin kuin mikroprosessien. (Reichenbach 1956, 149–150.)

Reichenbachin esimerkki makroprosessista on hiekkaranta, jossa tuuli toimii hiekanjyvien liikuttajana ja siten ”sekoitusmekanismina”. Tuuli siis täyttää hiekkarannan pinnassa olevia kuoppia irtohiekalla, ja jos ranta ajatellaan suljetuksi systeemiksi, niin sen tasapainotila on tila, jossa hiekkarannan pinta on tasainen. Toisin sanoen kaikkein *todennäköisin tila* hiekkarannalle on olla tasainen, eli ilman mitään merkittäviä kuoppia, painaumia tai kohoumia. Reichenbachin mukaan tällainen todennäköinen tila on määriteltävä korkean entropian tasapainotilaksi, koska havaintomme kertovat sen olevan todennäköisin tila. (Reichenbach 1956, 150.)

Myöhempiä käsittelyä varten huomionarvoista tässä on se, että Reichenbachin mukaan makroprosessin entropia ei noudattele mikroprosessien entropiaa. Hänen mukaansa hiekkarannan *mikrotila* (terminen tila) käy aina väistämättömästi läpi prosessin, jossa entropia kasvaa: Esimerkiksi rannalla kävelevän ihmisen jalasta vapautuu liike-energiaa, joka siirtyy osaan hiekanjyvistä. Tämä liike-energia muuttuu lämmöksi, kun hiekanjyvät pysähtyvät, ja jättävät jalanjäljet hiekkaan. Tämä lämpö taas tasaantuu hyvin nopeasti hiekkarannan ja ilman kesken, ja hiekkaranta saavuttaa termodynaamisen tasapainotilan, vaikka jalanjäljet ovat edelleen näkyvissä. Kuitenkaan hiekkarannan *makrotila* ei ole saavuttanut tasapainotilaa, sillä se saavutetaan vasta, kun jalanjäljet ovat poistuneet tuulen tuottaman sekoitusmekanismin kautta. (Reichenbach 1950, 151.) Makrotilan entropiaa ei siis saa sekoittaa mikrotilan entropian käsitteeseen. Mielestäni makrotilan entropian ymmärtämiseen tarvitsee ensin määrittää, mikä ominaisuus toimii systeemin tilan todennäköisyyden indikaattorina ja tämän ominaisuuden sekoitusmekanismi, joka lopulta tuottaa tasapainotilan. Edellisessä esimerkissä siis hiekkarannan havaittava todennäköisyyden ilmoittava ominaisuus olisi sen tasaisuus, ja sekoitusmekanismi olisi tuuli. Myöhemmin argumentoin, että jos makrotilan entropia ymmärretään tällä tavalla niin voidaan vastata ainakin joihinkin termodynaamista reduktiota vastaan esitettyihin kritiikkeihin.

Reichenbach jatkaa esittämällä, että jos nyt hiekkarannalla havaitaan jalanjäljet, niin nämä tekevät hiekkarannan entropiasta matalan. Jalanjäljet hiekassa ovat järjestynyt tila, ja siis hyvin epätodennäköinen ilmiö, jos oletetaan, että hiekkaranta on ollut suljettu systeemi koko historiansa. On hyvin epätodennäköistä, että tuuli kuljettaisi hiekan itsestään sellaiseen muotoon, että siinä vaikuttaisi olevan ihmisen jalanjäljet. Tämän epätodennäköisyyden vuoksi päätellään, että jossakin kohtaa historiassaan hiekkaranta ei ollutkaan suljettu vaan avoin, ja jokin vuorovaikutus toisen systeemin (yleisesti ottaen pääsysteemin, josta hiekkaranta on haarautunut omaksi systeemikseen) kanssa on aiheuttanut nämä jalanjäljet. Jalanjäljet toimivat siis *jälkinä* tapahtuneesta *vuorovaikutuksesta*. Jäljet ovat Reichenbachin mukaan *jäätynyttä järjestystä* (frozen order) eli epätodennäköinen makrotila. (Reichenbach 1956, 150–151.)

Koska jäljet ovat matalan entropian tiloja, niin on hyvin epätodennäköistä, että ne syntyisivät suljetussa systeemissä itsestään, joten on oletettava, että systeemi on avonainen menneisyydessä tai tulevaisuudessa (tai molemmissa). Nyt tulevaisuuden suunnaksi on määritelty se suunta, johon entropia haarasysteemeissä (tai ainakin suurimmassa osassa haarasysteemeistä) kasvaa, joten hyvin suurella todennäköisyydellä hiekkarannan entropia kasvaa tulevaisuudessa, ja vuorovaikutuksen jäljet häipyvät. Täten päätellään, että systeemi on ollut (ainakin hyvin suurella todennäköisyydellä) avoin juuri menneisyydessä, jossa siihen on voinut kohdistua vuorovaikutus, joka on *tuottanut* jäljen. (Reichenbach 1956, 151.) Myös esimerkiksi Grünbaum (1963, 282–283) ja Smart (2006, 469) esittävät vastaavan päättelyn omissa käsittelyissään ja tulevat samaan tulokseen kuin Reichenbach. Jäljet ovat siis jälkiä menneisyydestä eivätkä tulevaisuudesta, ja tämä seikka voidaan perustaa termodynamiikkaan ainakin Reichenbachin, Grünbaumin ja Smartin mukaan. Se, että havaittavia jälkiä on menneisyydessä tapahtuneista vuorovaikutuksista, mutta ei tulevaisuudessa tapahtuvista vuorovaikutuksista selittää monia edellä mainittuja psykologisia anisotropioita ajan suuntien välillä. Esimerkiksi se selittää sen, että menneisyydestä on enemmän tietoa kuin tulevaisuudesta ja sen, että tieto menneisyydestä on varmempaa kuin tulevaisuudesta.

Grünbaum kuitenkin huomauttaa, että tietyissä erikoistapauksissa eräänlaisia jälkiä voi olla myös tulevaisuudesta: Tietoisten olentojen tekemät *ennustukset* jotakin tilaa edeltävistä tiloista voivat toimia *indikaattorina* tästä tulevasta tilasta. Kahdella tilalla voi myös olla *yhteinen edeltävä syy*,

jolloin toinen näistä tiloista voi toimia indikaattorina toisesta *myöhemmästä* tilasta. Nämä tilanteet eroavat menneisyydessä tapahtuneiden vuorovaikutusten jäljistä siinä, että ehdot niiden syntymiselle ovat erilaiset. Vuorovaikutus on *riittävä ehto* jäljelle, jos jälki koskee menneisyydessä tapahtunutta vuorovaikutusta, mutta se ei ole riittävä ehto jäljen koskiessa tulevaisuudessa tapahtuvaa vuorovaikutusta. (Grünbaum 1963, 284–285.) Jäljen olemassaolo tulevaisuuden vuorovaikutuksesta vaatii siis enemmän kuin pelkän vuorovaikutuksen. Se vaatii joko tietoisten olioiden ennustuksen tai yhteisen syyn jäljelle ja vuorovaikutukselle. Koska vuorovaikutus riittää syyksi jälkeen menneisyydestä, mutta ei tulevaisuudesta, niin se takaa, että jälkiä on ainakin *huomattavasti enemmän* menneisyydestä kuin tulevaisuudesta. Myös tämä heikompi oletus jäljistä riittää selittämään edellä mainitut psykologiset anisotropiat.

### 7.1.2 Kausaalisen selitysmallin ja informaation kasvun reduktio

Reichenbachin mukaan myös *kausaalisten ja teleologisten*<sup>47</sup> selityksien ero voidaan palauttaa entropian kasvuun. Se, että selitykset jälkien syntymisestä ovat kausaalisia eivätkä teleologisia, seuraa entropian kasvusta ajan tulevaisuuden suuntaan. Reichenbach esittää, että jos edellä mainitussa jalanjäljet hiekkarannalla -esimerkissä aika vaihtaisi suuntaansa, mutta entropia kasvaisi samaan suuntaan kuin ennenkin (eli jos entropia kasvaisi menneisyyden suuntaan), niin selitys jälkien synnystä olisi teleologinen eikä kausaalinen. Tässä tapauksessa havaittaisiin, että rannalla on jalanjäljet, jotka tuuli saa aikaan ja jotka tulevat koko ajan näkyvämmiksi ja selvemmiksi. Kun jalanjäljet ovat täysin muotoutuneet, niin ranta lakkaa olemasta suljettu systeemi ja kokee vuorovaikutuksen, jossa rannalla sattuu kävelemään ihminen astuen tarkalleen tuulen muodostamiin jalanjälkiin. Koska jälkien syntyminen ilman vuorovaikutusta suljetussa systeemissä on erittäin epätodennäköistä, niin tässäkin tapauksessa jäljet selitettäisiin vuorovaikutuksen perusteella. Tässä käännetyn ajan tapauksessa tosin vuorovaikutus tapahtuu *myöhemmin* kuin jäljet ilmaantuvat. Jalanjälkien selittäänsi syntyvän siksi, että myöhempänä ajanhetkenä ihminen voisi kävellä rannalla sovittaen jalkansa näihin jälkiin. Jälkien selitykset olisivat siis teleologisia eivätkä kausaalisia, jos entropian kasvun suunta ei olisi tulevaisuuden suunta. (Reichenbach 1956, 153–155.)

<sup>47</sup> Teleologisella syyllä tarkoitetaan päämäärään tai tarkoitukseen viittaavaa syytä. Esimerkiksi teleologinen selitys sille, miksi ihmisellä on sydän voisi olla se, että se kierrättää verta elimistössä ja muuten ihminen kuolisi. Kausaalinen selitys sydämelle taas voisi olla jokin ihmisen kehityksen biologiaan viittaava selitys sydämen olemassaololle.

Selityksien kausaalinen luonne voidaan siis palauttaa termodynaamiseen teoriaan. Samalla tulee tietysti selitetyksi se, miksi kausaalirelaatiossa juuri pienemmän entropian tila on syy ja korkeamman entropian tila on seuraus. Edellä todettiin, että kausaalinen selitys on sellainen, jossa jäljet selitetään aiemmin tapahtuneen vuorovaikutuksen avulla. Koska syyt selittävät seurauksia eikä toisin päin, niin on ajateltava, että syynä toimii vuorovaikutus, ja seurauksena on jälki. Itse asiassa Reichenbach esittääkin vielä, että tästä voidaan löytää perusta myös *tuottamisen* ja *tallentamisen* (recording) välillä olevalle erolle. Hänen mukaansa nämä ovat relaatioita, jotka ovat toistensa kanssa käänteisiä. Syy (eli vuorovaikutus) tuottaa seurauksen ja seuraus tallentaa (siihen jää jälki vuorovaikutuksesta) syyn. Lisäksi jos tuottaminen on aktiivinen relaatio, niin silloin tallentaminen on passiivinen relaatio, eli tässä tapauksessa syy toimii aktiivisesti ja seuraus on vastaanottavana passiivisena osapuolena. Reichenbachin mukaan siis myös nämä emotionaalisesti ladatut termit voidaan palauttaa termodynaamiseen ajan suuntaan. (Reichenbach 1956, 155–156.)

Molemmat Reichenbach ja Grünbaum esittävät, että myös välitön (intuitiivinen) ajan kokeminen voidaan perustella entropian kasvulla. Heidän mukaansa jäljet lisääntyvät kasvavan entropian suuntaan, ja niin tekevät myös vastaavasti ihmisen muistot. Varastoidun informaation määrä siis kasvaa aina samaan suuntaan, kuin mihin entropia kasvaa. Lisäksi heidän mukaansa ihmisten kokeman psykologisen ajan suunta on se suunta, johon muistojen ja informaation määrä kasvaa. Tästä johtuen psykologisen ajan suunta on sama suunta kuin entropian kasvun suunta, ja psykologinen ajan suunta voidaan *palauttaa* termodynaamiseen ajan suuntaan. (Grünbaum 1963, 289 ja Reichenbach 1956, luvut 20 ja 21.)

## 7.2 Termodynaamisen reduktion kritiikki

Ajan suunnan termodynaamista reduktiota vastaan on esitetty tietenkin myös kritiikkiä. Tässä luvussa nostan esille Lawrence Sklarin kritiikin koskien psykologisen ajan suunnan reduktiota ja John Earmanin kritiikin edellisessä luvussa esitettyä jälkien entropista teoriaa vastaan. Esitän myös kommentteja koskien näitä kritiikkejä, ja toivon näiden huomautusten puolustavan termodynaamista reduktiota sekä entropista teoriaa.

### 7.2.1 Psykologisen ajan suunnan reduktion kritiikki

Lawrence Sklar painottaa puhtaasti fysikaalisen ajan ja psykologisen ajan erottamista toisistaan. Hänen mukaansa termodynaaminen reduktio voi onnistua vain, jos siinä ajatellaan redusoituvan pelkkä fysikaalinen aika. Hänen ajatuksensa on se, että aikajärjestys-relaatio ja entropian määrä - relaatio kahden tapahtuman välillä ovat kaksi eri relaatiota, joiden voidaan kuvitella – ja intuitiivisesti koetaan – olevan toisistaan erillisiä. Kahden eri tapahtuman voidaan kokea olevan ajallisessa relaatiossa keskenään, vaikka niiden välillä ei olisi minkäänlaista hyvin määriteltyä entropista relaatiota. Tapahtumat voivat tapahtua eri systeemeissä, ja entropian määrän määrittely tietyille tapahtumalle ei muutenkaan ole mahdollista, sillä se täytyy määritellä aina tietyille systeemille. Lisäksi tietoa saadaan kahden tapahtuman välisestä ajallisesta relaatiosta ja niiden välisestä entropia-relaatiosta hyvin erilailla. Ajallisen relaation ajatellaan olevan ihmisen kokemukselle välitön, kun taas entropian määrä tapahtumien välillä pitäisi jotenkin tieteellisesti mitata ja varmentaa. (Ks. Esim. Sklar 1993, 109–110 ja Sklar 1997, 224–225.)

Edellä huomautettiin, että jos tarkoituksena on identifioida ajan suunta entropian kasvun suunnaksi, niin tällöin on selitettävä myös psykologiset anisotropiat ajan suuntien välillä. Tulee siis myös selittää se, miksi menneisyys ja tulevaisuus havaitaan niin erilaisiksi ja miksi aika tuntuu kulkevan menneisyydestä tulevaisuuteen eikä toisinpäin. Tämän huomion myös Sklar (1993, 109–110) näyttää hyväksyvän. Sklarin ehdotuksesta on kuitenkin huomattava, että jollei tarkoituksena ole selittää psykologista aikaa ollenkaan, niin mikään ei anna syytä uskoa, että ajan suunta on todella *identifioitu* entropian kasvusuunnaksi, eikä ole vain löydetty *korrelaatiota* näiden välillä. Hieman epäselväksi Sklarin käsittelystä jääkin, mitä hänen mielestään termodynaaminen reduktio voi käsittää, mutta itse tulkitsisin häntä siten, että hänen mukaansa nimenomaan psykologisen ajan sisäinen kokemus ei olisi entropian avulla selitettävissä. Tällaisella sisäisellä ajan kokemuksella ymmärrän sitä, että ajan koetaan välittömästi kulkevan hetki hetkeltä eteenpäin, vaikka mitään ulkoista ajallista prosessia ei suoraan havaittaisikaan.

Millä tavalla sitten ajan kulku koetaan välittömästi, jollei mitään ajallista prosessia havaita? Mistä tämä psykologisen ajan sisäinen kokemus koostuu? Jos seurataan Sklaria hänen ehdottamallaan linjalla, niin silloin ajalle itselleen olisi postuloitava sisäinen suunta, joka on fundamentaali, eikä palaudu mihinkään fysikaaliseen prosessiin. Lisäksi tämä fundamentaali ajan suunta koetaan välit-

tömästi, vaikka sillä ei ole fysikaalisessa havaittavassa maailmassa mitään perustaa. Mielestäni tällöin ihmisellä olisi oletettava olevan kyky havaita tämä ajan perustava ominaisuus, joka ei kuitenkaan ilmaise itseään ulkoisessa maailmassa mitenkään. Jos taas tällainen fundamentaalinen ajan suunta postuloidaan maailmaan, niin silloin termodynaaminen reduktio epäonnistuu kokonaisuudessaan. Tällöin nimittäin niin fysikaalinen kuin psykologinenkin ajan suunta selittyy tällä fundamentaalilla ajan ominaisuudella. Sklarin esitys, että fysikaalinen aika voisi palautua termodynaamisiin prosesseihin, mutta psykologinen ei, vaikuttaa siis ainakin mielestäni epäkoherentilta. Psykologisen ajan suunnan tulisi ajatella seuraavan fysikaalisesta ajan suunnasta, eli joistakin ei-käännettävistä prosesseista kuten entropian kasvusta.

Esimerkiksi Grünbaum (1963, 290) esittääkin, että termodynaamisessa tasapainotilassa ihmisillä ei olisi minkäänlaista ajallista tietoisuutta ja psykologinen ajan suunta kadotettaisiin. Mielestäni ihmistä olisikin ajateltava organismina, joka tulkitsee havaittuja ärsykyksiä ja muodostaa maailmankuvansa näiden ärsykkeiden pohjalta. Jos maailmassa ei ole muuta fysikaalisen ajan suunnan tuottavaa havaittavaa ärsykettä kuin entropian kasvu, niin silloin myös psykologinen ajan suunta on palautettava siihen.

### 7.2.2 Korkean entropian tilat jälkinä

Myös Earman hyökkää ajan termodynaamista reduktiota vastaan. Erityisesti hänen kritiikkinsä kohdistuu termodynaamiseen selitykseen jäljistä jäätyneenä järjestyksenä. Hän argumentoi, että myös korkean entropian tila voi olla jälki menneisyydessä tapahtuneesta vuorovaikutuksesta. Hänen oma esimerkkinsä koskee evakuoituun kaupunkiin tiputettua pommia, joka jättää jälkeensä tiettyjä jälkiä (raunioituneita taloja). Earman kysyykin, millä tavalla pommista seuraava raunioiden muodostumisen prosessi on prosessi, jossa muodostuu hyvin järjestetty tila. Tällaisessa prosessi entropian tulisi vähentyä. (Earman 1974, 40.) Jos entropiaa ajatellaan tiukasti epäjärjestyksenä tai mikroprosessien termisenä tilana, niin silloin pommi saa aikaan vain enemmän epäjärjestystä korkean entropian tilan. Tällöin myös korkean entropian tila toimisi jälkenä vuorovaikutuksesta. Myös esimerkiksi Barrett ja Sober (1992, 145) jakavat Earmanin ajatuksen, että korkean entropian tilat voivat toimia jälkinä. Tässä vastustuksessa on kieltämättä oma ajatuksensa, sillä entropian käsitettä joudutaan venyttämään, jotta pommitettu kaupunki voitaisiin tulkita matalan entropian tilaksi. Mielestäni tällainen tulkinta on kuitenkin mahdollinen, kunhan muistetaan tehdä erottelu Reichenbachin mikroentropian ja makroentropian välillä.

Nyt voidaan tarkastella, millainen makrotila pommitettu kaupunki on. Muistetaan, että Reichenbachin (1950, 150–151) mukaan makroentropian tutkimiseksi on ensin määriteltävä se systeemin ominaisuus, joka kertoo systeemin tilan todennäköisyyden ja tähän ominaisuuteen liittyvä sekoitusmekanismi. Ominaisuus, jonka tilan todennäköisyyteen pommin voisi ajatella vaikuttavan eniten, on rakennusten kunto ja se, että niitä on tasaisesti joka puolella. Olkoon siis rakennusten kunnan ja sijainnin tasaisuus se ominaisuus, joka kertoo kaupungin tilan todennäköisyyden eli entropian.. Nyt näiden ominaisuuksien sekoitusmekanismiksi voisi kuvitella ihmisten toiminnan. Ihmiset todennäköisesti säännöllisesti kunnostavat taloja, ja rakentavat niitä tasaisesti ympäri kaupunkia siten, että mikään alue ei ole tarkoituksetta tyhjänä. Nyt jos ajatellaan, että kaupunki on ollut suljettu systeemi<sup>48</sup> menneisyydessä, niin korkean entropian *todennäköinen* tila on, että kaupungissa elää ihmisiä ja kaikki talot ovat pystyssä ja hyväkuntoisia. Täten autio kaupunki on kaupunkina jo itsessään hyvin epätodennäköinen, mutta vielä epätodennäköisempi on kaupunki, joka on autio, ja jonka tietty osa on täysin romahtanut, kun muut rakennukset ovat täysin ehjiä. Pommin jälkeinen kaupunki on siis kaupunkina hyvin matalan entropian *epätodennäköisessä* tilassa, mistä voitaisiin päätellä, että kaupunki ei ole ollut suljettu systeemi, vaan siihen on kohdistunut jokin vuorovaikutus. Tällä tavalla tulkittuna on vaikeaa nähdä, miten autio ja osittain raunioitunut kaupunki voitaisiin nähdä korkean entropian (todennäköisenä) tilana. Itse asiassa myös Reichenbach (1956, 151) on sitä mieltä, että mikroentropia kasvaa kaikissa prosesseissa (kuten tässä pommin räjähdyksessä), mutta näissä prosesseissa makroentropia voi kuitenkin laskea. Earmanin nähdään siis sekoittavan keskenään tilan mikroentropian ja makroentropian.

Lisäksi nähdään, että Earmanin argumentissa sekoitusmekanismi vaihtuu kesken prosessin. Kaupungin sekoitusmekanismina ovat toimineet ihmiset ennen pommia, ja kun kaupunki on evakuoitu, niin sekoitusmekanismiksi ovat vaihtuneet luonnonvoimat. Täten myös kaupungin korkean entropian (todennäköinen) tila muuttuu hyväkuntoisista tasaiseen rakennetuista taloista tilaksi, jossa talot ovat rapistuneita ja romahtaneita. Jos sekoitusmekanismiksi valitaan luonnonvoimat, niin silloin kaupungin olemassaolo olisi jo erittäin epätodennäköinen tila, sillä ne eivät synny luonnonvoimien seurauksena itsestään. Täten myös pommitettu kaupunki, jossa yksi kaupungin osa on romahtanut, olisi epätodennäköinen matalan entropian tila (vaikkakin hieman vähemmän epätodennäköinen kuin

<sup>48</sup> Tässä siis oletetaan, että kaupunkia ei ole kohdannut mikään erityisen suuri vuorovaikutus. Tietenkin kaupunki vaatii jokapäiväistä vuorovaikutusta toisten systeemien (esimerkiksi toisten kaupunkien) kanssa vaikkapa kaupan muodossa, jotta se olisi elinvoimainen ja hyvinvoiva.

hyvin hoidettu kaupunki). Jos sekoitusmekanismi taas ovat ihmiset, niin pommitetun näköinen kaupunki olisi myös hyvin epätodennäköinen, koska ihmiset rakentaisivat kaupungin tasaisesti ja pitäisivät kaikki sen osat kunnossa.

Voidaan myös tarkastella, millä tavalla jälki häviää entropian kasvun seurauksena olemasta tässä pommitetun kaupungin tapauksessa: Jos kaupunki pysyy autiona pommin räjähdysen jälkeenkin, niin silloin autiokaupungin korkean entropian tasapainotila olisi tila, jossa kaikki kaupungin talot ovat romahtaneet ajan myötä. Tällöin myös pommituksen jäljet ovat häipyneet näkyvistä, sillä pommin seurauksena syntyneitä raunioita ei voida erottaa luonnonvoimien kautta syntyneistä raunioista. Hoitamaton autiokaupunki siis jossakin vaiheessa raunioituu itsestään luonnonvoimien seurauksena. Tästä kokonaan raunioituneesta entropisen tasapainotilan saavuttaneesta kaupungista ei jossakin vaiheessa enää voida erottaa sitä, mitkä rauniot ovat syntyneet pommin jäljiltä ja mitkä itsestään ajan kuluessa entropian kasvun seurauksena. Toisaalta, jos pommin räjähdysen jälkeen kaupunkiin palaa jälleen asumaan ihmisiä, niin hyvin suurella todennäköisyydellä he jälleenrakentavat kaupungin ja raunioituneet talot. Tässäkin tapauksessa pommin jättämä jälki häviää entropian kasvun seurauksena. Tässä siis sekoitusmekanismin valinnasta riippuu, mikä on kaupungin tasapainotila, mutta kummassakaan tapauksessa ei heti pommin räjähdysen jälkeinen tila ole tällainen korkean entropian tasapainotila.

Ymmärtämällä entropia juuri makrotilan todennäköisyydeksi, voidaan ainakin yksi esitetty esimerkki korkean entropian jäljestä tulkita matalan entropian tilaksi. Barrett ja Sober tai Earman eivät kuitenkaan anna muita esimerkkejä jäljestä, joka olisi korkean entropian tila, joten oletan, että niitä ei ole niin helppo keksiä, kuin Earman (1974, 40) antaa ymmärtää. Huomautetaan kuitenkin, että luonnollisesti myös todennäköiset tilat voivat toimia jälkinä menneisyydestä, mutta silloin systeemi on ollut suljettu menneisyydessään, ja siellä ei ole tapahtunut mitään mielenkiintoista vuorovaikutusta. Systeemin korkean entropian tilat ovat todennäköisiä tiloja, jotka eivät vaadi mitään varsinaista selitystä, miksi systeemi on tässä tilassa. Toisin sanoen korkean entropian tila voi toimia jälkenä vain siitä, että systeemi on ollut suljettu pitkään menneisyydessään, eli vuorovaikutuksen puutteesta.



Earman (1974, 40) huomauttaa myös, että jälkeenä toimiva matalan entropian tila ei välttämättä ole seurausta vuorovaikutuksesta, vaan se voi seurata esimerkiksi spontaanista entropian vaihtelusta. Tämä on tietysti täysin totta, mutta äärimmäisen epätodennäköistä. Hiekkarannan hiekkaan voi syntyä tuulen seurauksena täydelliset jalanjäljet aivan sattumalta, mutta kukaan ei tosissaan ehdottaisi jalanjäljet havaittuaan, että ne olisivat seurausta spontaanista entropian heilahtelusta (eli pelkästä tuulesta). Sivuhuomautuksena tämä Earmanin kritiikki otettakoon huomioon, mutta mielestäni se ei aiheuta tarvetta laajemmalle käsittelylle tai entropisen teorian (tai termodynaamisen reduktion) korjaamiselle, saati hylkäämiselle.

### 7.2.3 Klassinen mekaniikka ja jälkien anisotropia

Earman esittää kritiikissään lisäksi, että pelkästään newtonilaiset mekaaniset lait voivat selittää sen, miksi jälkiä on menneisyydestä mutta ei tulevaisuudesta. Hänen argumenttinsa on, että jos jälki on jälki jostakin tapahtumasta, niin silloin tämän tapahtuman on oltava jäljen syy. Earmanin mukaan klassisen mekaniikan lait – vaikka ovatkin ajankäännös-invariantteja – eivät salli takaperin kulkevaa kausaatiota (tulevaisuuden vaikuttamista menneeseen). Jälkeä ei voi täten olla itse jälkeä myöhemmästä tapahtumasta, koska myöhemmillä tapahtumilla ei ole mitään vaikutusta aikaisempiin tapahtumiin. Koska myöhemmät tapahtumat eivät voi olla aikaisempien tapahtumien syitä, niin jälkeä (eli seurausta) ei voi olla sitä myöhemmästä tapahtumasta (syystä). Tästä johtuen myös klassisen mekaniikan lait takaavat Earmanin mukaan jälkien asymmetrian ajan suhteen. (Earman 1974, 41–42.)

Earmanin argumenttia on syytä kommentoida hieman. Ensiksikin ajan suunnan on oltava määrätty ennen, kuin jälkiä voidaan alkaa tutkia Earmanin mallin mukaisesti. Erityisesti kausaalista ajanteoriaa käsittelevässä luvussa huomattiin, että kausaalirelaatio on symmetrinen relaatio. Täten ei voida tietää, kumpi kahdesta keskenään kausaalisessa relaatiossa olevasta tapahtumasta on syy ja kumpi on seuraus, jollei ensin tiedetä, kumpi tapahtumista tapahtui *ennen* toista. Toisin sanoen on mahdollista erottaa syytä ja seurausta toisistaan ennen kuin itse ajan suunta on tiedossa. Earmanin mallissa jäljet ovat seurauksia jostakin syystä, mutta jollei voida sanoa, kumpi tapahtumista on syy ja kumpi seuraus, niin ei myöskään voida sanoa, kumpi tapahtumista on jälki ja kumpi sen tuottava vuorovaikutus. Mielestäni entropisen teorian hyväksi onkin laskettava se, että se selittää samalla kertaa ajan suunnan ja sen, miksi jälkiä on menneisyydestä mutta ei tulevaisuudesta. Earmanin mallissa olisikin ensin esitettävä jokin ajan suunnan teoria, ja vasta sitten voitaisiin vedota kausaaliseen seli-

tykseen jäljistä. Entropisessa jälkien teoriassa taas voidaan määritellä, kummat ovat jälkiä ja kummat vuorovaikutuksia jo ennen kuin ajan suunta on selvillä. Kun ajan suunta määritellään entropian kasvusuunnaksi, tullaankin samalla osoittaneeksi, miksi jälkiä on vain menneisyydestä. Tässä siis entropinen teoria saa tukea siitä, että se selittää myös jäljissä nähtävän ajallisen anisotropian, kun taas Earmanin mallissa täytyy olettaa, että jokin ajan suunnan teoria on jo alun alkaen tosi, ja vasta sitten voidaan erikseen selittää, miksi jälkiä on vain menneisyydestä. Mielestäni Earmanin teoria onkin nähtävä vain lisäyksenä entropiseen teoriaan siinä mielessä, että jos oletetaan entropisen teorian ajan suunnasta pitävän paikkansa, niin kausaalirelaation yksisuuntaisuus selittää jälkien anisotropian. Tällöin kuitenkin kausaalisuuteen vetoava klassisen mekaniikan teoria jäljistä *edellyttää* entropista teoriaa, ja toimii vain ylimääräisenä ja tarpeettomana *lisäyksenä* entropiseen teoriaan. Klassisen mekaniikan lakien *ei* siis voida nähdä yksinään selittävän jälkien anisotropiaa.

Toiseksi Earmanin määritelmä jäljestä *seurauksena* ei tunnu tavoittavan jäljen käsitteen merkitystä. Seuraukset on edellä ajateltu pelkästään syiden jälkeen tapahtuviksi – ja niiden kanssa ajankaltaisiksi – tapahtumiksi, eikä niiden oleteta seuraavan tuottamuksellisesti syystä. Täten siis kaikki tapahtumat voidaan nähdä minkä tahansa niitä *edeltävän* tapahtuman seuraukseksi. Kuitenkaan kaikkia tapahtumia (tai tiloja) ei voida mielestäni pitää jälkinä jostakin menneestä vuorovaikutuksesta. Esimerkiksi ei ole mielekästä kutsua jalanjäljet sisältäneen tilan jälkeistä – tasapainotilan saavuttanutta ja tasaista – hiekkarantaa jäljeksi siitä, että rannalla on menneisyydessä kävellyt ihminen. Korkean entropian tilalle ei tarvitse esittää selitystä, sillä se on todennäköinen tila, jolloin myöskään menneisyydessä tapahtunutta vuorovaikutusta ei tarvitse olettaa tapahtuneeksi. Ei siis ole mitään syytä tulkita tasaista hiekkarantaa jäljeksi rannalla kävelleen ihmisen tuottamasta vuorovaikutuksesta. Tätä vasten entropisen teorian ehdottama jäljen määritelmä (matalan entropian epätodennäköisenä tilana) tuntuu mielekkäältä vaihtoehdolta. Jäljet ovat sellaisia, että ne vaativat selitystä, ja vuorovaikutukset ovat tällaisia merkittäviä muutoksia systeemeissä, jotka selittävät jälkien olemassaolon. Mielestäni tämä ajatus sopii paremmin yhteen sen kanssa, miten tavallisesti jäljen käsite ymmärretään.

Kolmanneksi voidaan tarkastella myös, miten Earmanin versio ja entropinen versio toimivat ajassa, jossa entropia vähenee. Tällaisessa ajassa entropisen version mukaan jalanjäljet hiekassa ovat edelleen jälkiä vuorovaikutuksesta, mutta tässä tilanteessa vuorovaikutus vain tapahtuu myöhemmin kuin jäljen syntyminen. Tässä tapauksessa jäljen selitys muuttuu kausaalisesta teleologiseksi, ja

jalanjälkien ajatellaan syntyneen *jotta ihminen voisi tulevaisuudessa kävellä rannalla sovittaen jalkansa näihin jälkiin*. Earmanin versiossa taas jalanjäljet eivät olisi jälkiä vuorovaikutuksesta, vaan itse vuorovaikutus (eli syy), koska jäljet olivat aina *myöhempiä* kahdesta tapahtumasta. Jälki (eli seuraus) tästä vuorovaikutuksesta taas olisi se, että ihminen kävelee rannalla. Toisin sanoen *jalanjäljet saavat aikaan ihmisen kävelyn rannalla*. Tämä selitys jäljestä pysyy kausaalisenä, eikä vetoa teleologiseen syyhyn, kuten entropisessa versiossa tehdään. Omasta mielestäni teleologinen selitys on tässä tapauksessa mielekkäämpi, ja tuntuu absurdilta esittää, että jalanjäljet olisivat muulla kuin deterministisellä tavalla tuottamuksellinen syy sille, että rannalla kävellään myöhemmin.<sup>49</sup>

Earmanin versiota voidaan kuitenkin puolustaa hyväksymällä takaperin kulkeva kausaatio, jonka mukaan myöhemmin tapahtuvat tapahtumat voivat olla aikaisemmin tapahtuvien tapahtumien syitä. Itse asiassa Earman (1974, 41) itsekkin sanoo uskovansa tällaiseen mahdollisuuteen. Tässä tapauksessa siis myöhemmin tapahtuva rannalla kävely olisi syy aikaisemmin syntyneille jäljille. Jos tällainen liike tehdään, niin silloin kausaalirelaation suunta on sidottava johonkin muuhun kuin ajan suuntaan. Mielestäni ainoa mielekäs valinta – ainakin kyseisen esimerkin kohdalla – olisi määritellä kausaalisuhteen suunta entropian kasvun suunnaksi. Vain tällöin vältetään epäintuitiivinen tulos, että jalanjäljet olisivat rannalla kävelemisen syy – tai yleisemmällä tasolla esitettynä, että matalan entropian epätodennäköiset tilat olisivat syitä systeemin vuorovaikutuksille ulkomaailman kanssa. Tässäkin tapauksessa joudutaan kuitenkin turvautumaan entropiaan kausaalisuhteen suunnan määrittäjänä, aivan samalla tavalla kuin Reichenbach tekee kehittäessään termodynaamisen ajan suunnan teorian kausaalisen ajanteorian pohjalta. Väittäisinkin, että kausaalisuhteen käyttäminen sen selittämiseen, miksi jälkiä on menneisyydestä mutta ei tulevaisuudesta, ei ole entropisen teorian vaihtoehto ainakaan ennen kuin kausaalisuhteiden suunta voidaan määritellä jonkin muun kuin termodynaamisten prosessien avulla. Tämä taas edellyttää, että löydetään joitakin toisia prosesseja, jotka ovat ajankäännös-epäinvariantteja ja jotka ovat relevantteja havaituille ajallisille anisotropioille.

---

<sup>49</sup> Huomautan, että entropisessa teoriassa ajan suunta on aina samansuuntainen kuin entropian kasvu, jolloin kuvattu tilanne on täysin hypoteettinen entropisessa teoriassa. Tällaista tilannetta ei siis entropisen teorian mukaan käytännössä koskaan synny, muuten kuin mahdollisesti mikroentropian heilahtelujen mittakaavassa, jolla ei ole merkitystä ihmisen kokemukselle. Siis vaikka teleologinenkin selitys tuntuisi epäintuitiiviselta, niin sitä ei käytännössä käytetä, eikä sitä voida pitää entropisen teorian heikkoutena. Earmanin versiossa taas edellä kuvattu tilanne on täysin mahdollinen, koska ajan suuntaa ei ole sidottu entropiaan, ja esitetty epäintuitiivinen seuraus on aito ongelma teorialle.

## 8 LOPUKSI

Tässä tutkielmassa olen esittänyt, että fysikaaliset lait eivät ilman tiettyjä reunaehtoja muodosta fysikaalista perustetta ajan suunnalle tai tapahtumien aikajärjestykselle. Lisäksi olen arvioinut näiden reunaehtojen toimivuutta ja uskottavuutta. Tarkoituksena on ollut puolustaa kausaalista ajanteoriaa ja termodynaamista ajan suunnan teoriaa siinä määrin, että nämä on nähtävä vähintään relevantteina ja ajankohtaisina teorioina, jollei aivan lopullisina ratkaisuinä esitettyihin ongelmiin. Ainakin omasta mielestäni nämä teoriat ovat kattavimpia ja pisimmälle kehitettyjä vastauksia aikajärjestyksen ja ajan suunnan ongelmiin. Tähän mennessä mikään muu teoria ei ole selittänyt esimerkiksi psykologista ajan suuntaa yhtä uskottavasti kuin termodynaaminen teoria, eikä kausaalisen ajanteorian lisäksi muita teorioita tapahtumien aikajärjestyksestä ole varsinaisesti edes esitetty.

Kausaalista ajanteoriaa käsiteltäessä tultiin siihen tulokseen, että sitä vastaan esitetyt vastaväitteet eivät ole ratkaisevia, mutta sitä olisi myös täsmennettävä, jotta se vastaisi näiden kritiikkien esille nostamiin ongelmiin tyydyttävästi. Tulisikin esimerkiksi selventää, miten genidentiteetti voidaan ymmärtää ilman ajallista välissä-relaatiota, ja mitkä ovat tapahtumien identiteettiehdot suljetun ajan tapauksessa. Kausaaliset ajanteoriat siis sisältävät tiettyjä vastaamattomia kysymyksiä, mutta valitettavasti niiden kehittäminen on hyvin pitkälti pysähtynyt nykyisen huomion keskittyessä lähinnä ajan suunnan teorioihin. Ajan suunnan teoriat vastaavat tietenkin tapahtumien aikajärjestykseen siinä määrin, että ne luovat järjestyksen kausaalisesti yhdistettävälle tapahtumille avoimessa ajassa. Ne eivät kuitenkaan selitä intuitiivista käsitystä tapahtumien samanaikaisuudesta tai tuota aikajärjestyksestä suljetun ajan tapauksessa. Tämän lisäksi olen argumentoinut, että jonkinlainen kausaalinen teoria aikajärjestyksestä olisi tarpeellinen esimerkiksi aika-avaruuden ajallisen suunnistuvuuden takaamiseksi, mistä syystä kausaalisia teorioita ei tulisi mielestäni täysin siirtää taka-alalle.

Termodynaamiset prosessit taas vaikuttavat olevan ainoita fysikaalisia prosesseja, jotka voivat selittää havaitun ajan suunnan sekä menneisyyden ja tulevaisuuden väliset erot. Vaikka esimerkiksi kvanttimekaniikan prosesseista jotkin olisivatkin ajankäännös-epäinvariantteja, niin ainakaan tähän mennessä ei ole esitetty, miten ne selittäisivät psykologiset kokemukset ajan suunnasta tai sen, että kahvi ja maito sekoittuvat keskenään – eivätkä erotu toisistaan – kupissa. Vain termodynaamisten prosessien mittakaava on tarpeeksi suuri ja niiden psykologinen vaikutus riittävän hyvin esitetty, että niiden voidaan katsoa selittävän nämä seikat. Tässä työssä olen myös esittänyt, että termody-

naamisen teorian toimivuuteen vaadittavat reunaehdot (erityisesti menneisyshypoteesi) ovat uskotavia myös nykyaikaisen kosmologian näkökulmasta. Suurin kritiikki vaikuttaakin kohdistuvan siihen, voidaanko entropian käsitettä venyttää koskemaan makroprosesseja kuten hiekkarantoja, kaupunkeja ja galakseja. Tässä työssä olenkin argumentoinut, että näissä tapauksissa makroentropia tulee ymmärtää ennemmin analogisena mikroentropian kanssa kuin sen suorana johdannaisena. Jos makroentropia voidaan määritellä tyydyttävästi, niin silloin entropian kasvu makrosysteemeissä voisi tuottaa ajan suunnan myös universumin mittakaavassa.

Tässä työssä olen yrittänyt vastata siihen kysymykseen, että luovatko termodynaamiset prosessit fysikaalisen perustan ajan suunnalle. Vastaus tähän kysymykseen riippuu kuitenkin siitä, hyväksytäänkö tietyt vaadittavat reunaehdot. Joka tapauksessa olen pyrkinyt tuomaan esille termodynaamisen teorian vahvuuksia ja argumentoinut sen olevan ainakin tällä hetkellä mielekkäin ratkaisu ajan suunnan ongelmaan. Keskustelu termodynaamisista ajan suunnan teorioista onkin aktiivisesti käynnissä, ja tässä työssä on yritetty selventää keskustelun taustaa, esitellä aiheen ympärillä viimeaikoina käytyä diskurssia sekä arvioida keskustelussa esitettyjä argumentteja. Filosofiselle kysymykselle tyypillisesti varsinaiseen ratkaisuun ei siis olla päädytty, mutta tavoitteena onkin lähinnä argumentoida sen puolesta, minkä teorian tutkimiseksi filosofisia ja luonnontieteellisiä voimavaroja tulisi käyttää. Tämän työn valossa olenkin sitä mieltä, että termodynaaminen ajan suunnan teoria olisi yksi teoria, johon tällaista lisähuomiota tulisi kohdistaa.

## Lähdeluettelo

- Albert, D. Z. (2000). *Time and Chance*. Cambridge MA: Harvard University Press.
- Armstrong, D. M. (1997). *A World of States of Affairs*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Barrett, M. & Sober, E. (1992). Is Entropy Relevant to the asymmetry between Retrodiction and Prediction. *The British Journal for the Philosophy of Science* , 42 (2), 141-160.
- Beebe, H. (2000). The Non-Governing Conception of Laws of Nature. *Philosophy and Phenomenological Research* , 61 (3), 571-594.
- Berger, G. (1971). Earman on Temporal Anisotropy. *The Journal of Philosophy* , 68 (5), 132-137.
- Boltzmann, L. (1897). On Zermelo's Paper "On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes" (Zu Hr. Zermelo's Abhandlung Über die mechanische Erklärung). Teoksessa S. Brush, *Kinetic Theory: Irreversible Processes (1966)* (S. Brush, Käänt., ss. 238-245). New York: Pergamon Press.
- Bridgman, P. W. (1950). *Reflections of a Physicist*. New York: Philosophical Library.
- Callender, C. (2010). The Past Hypothesis Meets Gravity. Teoksessa G. Ernst;& A. Hüttermann, *Time, Chance and Reduction: Philosophical Aspects of Statistical Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Callender, C. (2004). There is no Puzzle about the Low-Entropy Past. Teoksessa C. Hitchcock, *Contemporary Debates in Philosophy of Science* (ss. 240-255). Oxford: Blackwell publishing Ltd.
- Callender, C. (15. 11 2001). *Thermodynamic Asymmetry in Time*. Haettu 13. 11 2011 osoitteesta Stanford Encyclopedia of Philosophy: <http://plato.stanford.edu/entries/time-thermo/>
- Carroll, S. (2010). *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*. Oxford: Oneworld.
- Earman, J. (1974). An Attempt to Add a Little Direction to "The Problem of the Direction of Time". *Philosophy of Science* , 41 (1), 15-47.
- Earman, J. (1967). Irreversibility and Temporal Asymmetry. *The Journal of Philosophy* , 64 (18), 543-549.
- Earman, J. (1972). Notes on the Causal Theory of Time. *Synthese* , 24, 74-86.

- Earman, J. (2006). The "Past Hypothesis": Not Even False. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* , 37 (3), 339-430.
- Earman, J. (1969). The Anisotropy of Time. *Australasian Journal of Philosophy* , 47 (3), 273-295.
- Earman, J. (2002). What Time Reversal Invariance Is and Why It Matters. *International Studies in the Philosophy of Science* , 16 (3), 245-264.
- Earman, J. (1989). *World Enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Eddington, A. (1928). *The Nature of the Physical World*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Einstein, A. (2003). *Erityisestä ja yleisestä suhteellisuusteoriasta (Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, 1917)*. (R. Lehti, Käänt.) Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys URSA.
- Einstein, A. & Infeld, L. (1962). *Fysiikan kehitys (The Evolution of Physics, 1938)*. (H. Hirvonen, Käänt.) Helsinki: Otava.
- Esfeld, M. (2006). Popper on Irreversibility and the Arrow of Time. Teoksessa I. Jarvie, K. Milford & D. Miller, *Karl Popper: A centenary assessment. Volume III: Science*. Aldershot: Ashgate.
- Feynman, R. (1985). *The Character of Physical Laws*. Cambridge MA: MIT Press.
- Feynman, R. (1964). *The Feynman Lectures on Physics*. Boston: Addison-Wesley.
- Geroch, R. (1981). *General Relativity from A to B*. Chicago: University of Chicago Press.
- Goldstein, S. (2001). Boltzmann's Approach to Statistical Mechanics. In J. Bricmont, D. Dürr, M. C. Galavotti, G. Ghirardi, F. Petruccione & N. Zanghi, *Chance in Physics: Foundations and Perspectives (Lecture Notes in Physics 574)*. Berlin: Springer-Verlag.
- Grünbaum, A. (1963). *Philosophical Problems of Space and Time*. New York: Alfred A. Knopf.
- Griffiths, D. (1987). *Introduction to Elementary Particles*. John Wiley & Sons.
- Guth, A. (2004). Inflation. Teoksessa W. L. Freedman, *Carnegie Observatories Astrophysics Series, Vol 2: Measuring and Modeling the Universe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hawking, S. (1989). *Ajan lyhyt historia (A Brief History of Time, 1988)*. (R. Varteva, Käänt.) Porvoo: WSOY.

- Hurley, J. (2004). *A Paradox in Time*. Booklocker.com, Inc.
- Lacey, H. M. (1968). The Causal Theory of Time: A Critique of Grünbaum's Version. *Philosophy of Science* , 35 (4), 332-354.
- Lampinen, M. J. (2010). *Termodynamiikan perusteet*. Helsinki: Otatieto.
- Lewis, D. (1994). Humean Supervenience Debugged. *Mind* , 103, 473-490.
- Linde, A. (1994). The Self-Reproducing Inflationary Universe. *Scientific American* , 271 (5), ss. 48-55.
- Malament, D. B. (2004). On the Time Reversal Invariance of Classical Electromagnetic Theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* , 35, 295-315.
- Mehlberg, H. (1961). Physical Laws and Time's Arrow. Teoksessa H. Feigl; & G. Maxwell, *Current Issues in the Philosophy of Science*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Newton, I. (1934). *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World (Philosophiae naturalis principia mathematica 1687)*. (A. Motte & F. Cajori, Käänt.) Berkeley: University of California Press.
- North, J. (2011). Time in Thermodynamics. Teoksessa C. Callender, *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*. Oxford: Oxford University Press.
- North, J. (2008). Two Views on Time Reversal. *Philosophy of Science* , 75, 201-223.
- Penrose, R. (1989). *The Emperor's New Mind*. Oxford: Oxford University Press.
- Popper, K. R. (1956a). Irreversibility and Mechanics. *Nature* , 178, 382.
- Popper, K. R. (1957). Irreversible Processes in Physical Theory. *Nature* , 179, 1297.
- Popper, K. R. (1958). Irreversible Processes in Physical Theory. *Nature* , 181, 402-403.
- Popper, K. R. (1956b). The Arrow of Time. *Nature* , 177, 538.
- Price, H. (2004). On the Origins of the Arrow of Time: Why there is Still a Puzzle about the Low-Entropy Past. Teoksessa C. Hitchcock, *Contemporary Debates in Philosophy of Science* (ss. 219-239). Oxford: Blackwell publishing Ltd.



- Reichenbach, H. (1969). *Axiomatization of the Theory of Relativity (Axiomatik der relativischen Raum-Zeit-Lehre, 1924)*. (M. Reichenbach, Käänt.) Berkeley: University of California Press.
- Reichenbach, H. (1956). *The Direction of Time (Uusintapainos 1971. New York: Dover)*. Berkeley: University of California Press.
- Reichenbach, H. (1958). *The Philosophy of Time and Space (Philosophie der Raum-Zeit-Lehre, 1928)*. (M. Reichenbach;& J. Freund, Käänt.) New York: Dover.
- Sklar, L. (1993). *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sklar, L. (1974). *Space, Time and Spacetime*. Berkeley: University of California Press.
- Sklar, L. (1997). Time in Experience and in Theoretical Description of the World. Teoksessa S. F. Savitt, *Time's Arrows Today: Recent Physical and Philosophical Work on the Direction of Time* (ss. 217-229). Cambridge: Cambridge University Press.
- Sklar, L. (1993). Up and Down, Left and Right, Past and Future. Teoksessa R. Le Poidevin;& M. MacBeath, *The Philosophy of Time* (ss. 99-116). Oxford: Oxford University Press.
- Smart, J. J. (2006). Time. Teoksessa D. M. Borchert, *Encyclopedia of Philosophy, 2nd edition, Vol. 8* (ss. 461-475). Farmington Hills, MI: Thomson Gale.
- Swinburne, R. (1968). *Space and Time*. Lontoo: Macmillan.
- Wald, R. (2006). The Arrow of Time and the Initial Conditions of the Universe. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* , 37 (3), 394-398.
- Van Fraassen, B. (1970). *An Introduction to the Philosophy of Time and Space*. New York: Random House.
- Weingard, R. (1972). Berger on Earman on Temporal Anisotropy. *The Journal of Philosophy* , 69 (21), 786-790.
- Young, H. D. & Freedman, R. A. (2011). *University Physics With Modern Physics (13th Edition)*. Boston: Addison Wesley.